www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

14e JAARGANG No. 11, blz. 309-348 NOVEMBER 1952

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

EEN EXPERIMENTELE TELEVISIE-EINDTRAP VOOR 100 kW

door D. ZAAYER.

621.397.645.026.445

Het is gelukt een televisie-eindtrap in laboratoriumopstelling, met frequenties tot 68 MHz en een resonantiekromme geschikt voor een bandbreedte van 6 MHz, een vermogen van 100 kW te doen leveren. Een vermogen van deze grootte maakt een goede televisie-ontvangst ook een eindweegs achter de optische horizon mogelijk.

Een televisiezender wordt gewoonlijk opgesteld midden in of aan de rand van een dicht bevolkt gebied. Valt dit gebied, van de zendantenne uit gezien, grotendeels binnen de optische horizon, dan kan men, om het in zijn geheel te bestrijken, voor de beeld- en de geluidzender volstaan met een vermogen van enige kW. Het gebied kan echter ook zo uitgestrekt zijn dat een veel groter zendvermogen gewenst is, ten einde ook een eindweegs achter de horizon nog een goede ontvangst mogelijk te maken.

Een andere reden waarom sterke zenders wenselijk zijn, is hierin gelegen dat men vaak weinig effectieve ontvangantennes gebruikt, hetzij omdat de toestelbezitter liever een antenne in de kamer gebruikt dan een op het dak, hetzij omdat de antenne geschikt moet zijn voor ontvangst uit uiteenlopende richtingen en op zeer verschillende golflengten, hetgeen tot een vrij ongunstig compromis leidt.

Om deze redenen heeft het zin, studie te maken van het opwekken van grote vermogens bij de frequenties waarop televisiezenders werken. Wat deze frequenties betreft, komt voor een dergelijke studie in de eerste plaats in aanmerking de laagste frequentieband die voor televisie beschikbaar is gesteld. Deze band strekt zich uit van 41 tot 68 MHz.

Een van de moeilijkheden daarbij is, dat de bandbreedte van een beeldzender zeer groot moet zijn, bijv. 6 MHz voor het televisiestelsel met 625 lijnen en 25 beelden per seconde.

Een (volledig) televisiebeeld bestaat bij dit stelsel uit $^4/_3 \times 625^2 \approx 520\,000$ beeldelementen (de breedte van het beeld is $^4/_3$ maal de hoogte). Nemen we aan dat de beeldlijnen worden gevormd door afwisselend witte en zwarte beeldelementen, dan komt de tijd waarin twee naast elkaar liggende elementen worden afgetast, overeen met één periode van het beeldsignaal. Eén volledige aftasting van het beeldveld beslaat dus $^1/_2 \times 520\,000 = 260\,000$ perioden. Daar het beeld 25 maal per seconde volledig wordt afgetast, is de frequentie van het beeldsignaal $25 \times 260\,000$ Hz = 6,5 MHz. Bij nadere beschouwing blijkt dit nog enige correctie te behoeven, zodat men in de practijk kan volstaan met een hoogste modulatiefrequentie van 5 MHz.

Een aantal Europese landen hebben het stelsel met 625 lijnen aanvaard volgens de norm die het Comité Consultatif International des Radiocommunications (C.C.I.R.) heeft opgesteld [1]). Volgens deze norm moet de beeldzender werken met een asymmetrisch zijbandsysteem, ten einde het in beslag genomen frequentiegebied niet nodeloos groot te maken; dwz. uitgezonden moeten worden de draaggolf en de bovenste zijband, terwijl de benedenste zijband grotendeels moet worden onderdrukt. De totale breedte van een kanaal (beeld en geluid) bedraagt dan 7 MHz.

Als ideale frequentiekarakteristiek (antennestroom als functie van de frequentie) van de complete beeldzender wordt beschouwd de kromme *1* in *fig. 1*. Een zekere tolerantie is echter noodzakelijk; deze wordt gegeven door het verschil tussen de

[1]) Standards for the international 625-line black and white television system, C.C.I.R., Genève, 10 October 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

krommen *1* en *2*. Zo is bijv. bij een frequentie van 5 MHz boven de draaggolffrequentie een daling van 50% = 6 dB nog toelaatbaar.

De frequentiekarakteristiek van een beeldzender wordt bepaald door een kleiner of groter aantal delen

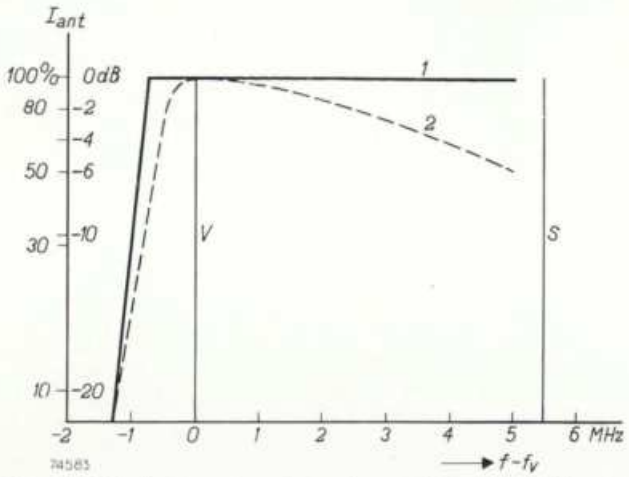


Fig. 1. *1* ideale, *2* nog toegelaten frequentiekarakteristiek van een televisiezender met 625 beeldlijnen, volgens de voorlopige norm van het C.C.I.R. Verticaal is uitgezet de antennestroom I_{ant}, horizontaal het verschil tussen de frequentie f en de vaste frequentie f_v van de videodraaggolf.
De verticale lijnen *V* en *S* stellen resp. de videodraaggolf en de geluidsdraaggolf voor.

waaruit de zender bestaat, al naar gelang van de wijze van moduleren. Er zijn namelijk twee manieren waarop men een beeldzender kan moduleren:
1) Bij constant gehouden hoogfrequente stuurspanning aan de ingang van de eindtrap varieert men de negatieve roosterspanning volgens het videosignaal; men spreekt dan van moduleren in de eindtrap.
2) Men kan ook moduleren in een voortrap, door reeds in de stuurtrap of in een daaraan voorafgaande trap de negatieve roosterspanning volgens het videosignaal te variëren; de eindtrap heeft dan een gemoduleerde hoogfrequente stuurspanning en een constante negatieve roosterspanning, en werkt als lineaire versterker.

De frequentiekarakteristiek van de zender nu hangt bij moduleren in de eindtrap alleen af van de modulator, de stuurtrap, de eindtrap, de antenne en het filter dat zich ter onderdrukking van de benedenste zijband tussen de eindtrap en de antenne bevindt. Bij moduleren in een voortrap zijn bovendien nog de als versterker fungerende voortrappen van invloed.

Wegens het belang van het opwekken van grote vermogens — zie boven —, interesseren wij ons in dit artikel voornamelijk voor de eindtrap van een beeldzender. Dit onderdeel van de zender mag aansprakelijk zijn voor slechts een fractie van het toegelaten verschil tussen de beide karakteristieken in fig. 1. Wij hebben ons ten doel gesteld, een van 48 tot 68 MHz afstembare eindtrap een zodanige resonantiekromme te geven dat bij een frequentie van 5 MHz boven de draaggolffrequentie de kromme niet meer dan 1 dB is gedaald — en wel voor het geval dat de eindtrap slechts een enkelvoudige uitgangskring heeft, die op een weerstand is belast. Bij variatie van de frequentie over 6 MHz (5 MHz voor de bovenste zijband plus 1 MHz voor de benedenste) moet de stroom in deze weerstand dus tot op 1 dB constant blijven.

De aanwezigheid van slechts één kring maakt de situatie ongunstiger dan bij een werkelijke zender. Daar heeft men namelijk een voedingsleiding van de eindtrap naar de antenne nodig. Om de zender zo min mogelijk harmonischen te laten uitstralen (die andere verbindingen kunnen storen), is het gunstig deze leiding inductief met de uitgangskring te koppelen. Deze kring en de antennekring werken samen dan als een bandfilter, dat, bij eenzelfde buisbelasting, een grotere resonantiebreedte geeft dan een enkelvoudige kring.

Aan de eis kan het gemakkelijkst worden voldaan door de resonantiefrequentie van de uitgangskring niet precies te doen samenvallen met de draaggolffrequentie, maar haar iets hoger te leggen, bijv. 1,5 MHz, zoals dat voor het televisiekanaal 4 [2]) is

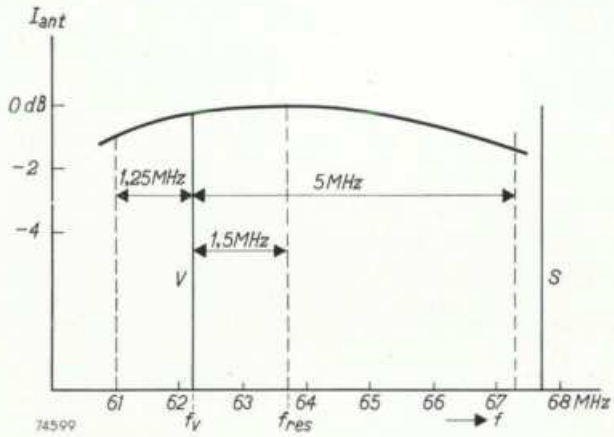


Fig. 2. Resonantiekromme van de eindtrap van een beeldzender. f_{res} resonantiefrequentie, f_v frequentie van de videodraaggolf (televisiekanaal 4). *V* videodraaggolf, *S* geluidsdraaggolf. Door f_{res} ongeveer 1,5 MHz boven f_v te leggen bereikt men dat de resonantiekromme gunstig komt te liggen ten opzichte van de frequentieband van f_v — 1,25 MHz tot f_v + 5 MHz.

[2]) Een internationale conferentie te Stockholm (1952) heeft voor de verdeling van de golflengten voor Europese televisiezenders vijf plannen opgesteld, resp. voor de landen die de norm van het C.C.I.R. aanvaarden, voor Groot-Brittannië, voor Frankrijk, voor België en voor Oost-Duitsland.
In dit artikel komen enige kanalen uit het plan voor de C.C.I.R.-landen ter sprake, welke kanalen wij 2, 3, en 4 hebben genoemd (deze nummering is niet officieel). De videodraaggolffrequentie van kanaal 2 is 48,25 MHz, die van kanaal 3 is 55,25 MHz en die van kanaal 4 is 62,25 MHz. Zij liggen alle in de meergenoemde frequentieband van 41 tot 68 MHz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

weergegeven in *fig. 2*. Niettemin is het verre van eenvoudig, een over 6 MHz voldoend vlakke karakteristiek te verkrijgen, vooral indien het grote vermogens betreft. De tegenstrijdigheid van een vlakke resonantiekromme en groot vermogen zal hier eerst worden toegelicht.

Resonantiebreedte en vermogen

In *fig. 3a* is de anodeketen van een eindtrap in balansschakeling voorgesteld. Als trillingskring is eenvoudigheidshalve een *LC*-kring getekend, hoewel in televisiezenders, die met golflengten van enige

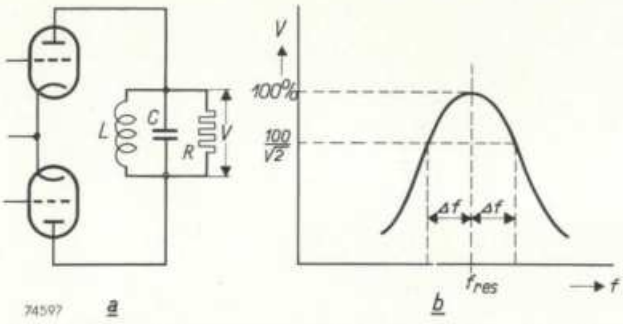


Fig. 3. *a*) Anodeketen van een eindtrap in balansschakeling. *L-C* trillingskring, met een totale belasting *R*.
b) Resonantiekromme: de spanning *V* over de combinatie *L-C-R* als functie van de frequentie *f*, bij constante roosterwisselspanning. De resonantiebreedte is $2\Delta f$.

meters werken, in werkelijkheid lechersystemen worden gebruikt (zie later). De parallelweerstand *R* vertegenwoordigt zowel de nuttige belasting, die door de antenne wordt gevormd, als de verliezen in de kring en de demping die de zendbuizen teweegbrengen.

Een keten als deze heeft een resonantiekromme die is voorgesteld in fig. 3*b*. Als „breedte" van de resonantie definieert men $2\Delta f$, indien Δf het bedrag is dat de frequentie *f* moet verschillen van de resonantiefrequentie f_{res} om de spanning over de kring te doen dalen tot $\frac{1}{2}\sqrt{2}$ maal de waarde die bij resonantie optreedt, bij constante wisselspanning op de stuurroosters. Voor Δf geldt:

$$\Delta f = \frac{1}{4\pi CR}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Bij de normale instelling (H.F. klasse B) is de anodestroom de ene halve periode sinusvormig (amplitude $I_{a\,max}$) en de andere halve periode nul (*fig. 4*). De eerste harmonische hiervan (stippellijn) heeft de amplitude $\frac{1}{2} I_{a\,max}$ en dus de effectieve waarde $I_{a\,max}/(2\sqrt{2})$. Het in de parallelweerstand *R* gedissipeerde vermogen *P* is dus:

$$P = \left(\frac{I_{a\,max}}{2\sqrt{2}}\right)^2 R,$$

of

$$R = \frac{8P}{I_{a\,max}^2}.$$

Dit gesubstitueerd in (1) geeft voor de halve breedte van de resonantiekromme:

$$\Delta f = \frac{I_{a\,max}^2}{32\pi CP}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

We zien hieruit dat Δf en *P* omgekeerd evenredig met elkaar zijn. Om bij een bepaalde resonantiebreedte het vermogen zo groot mogelijk te maken, moet men de capaciteit *C* zo klein mogelijk maken en de topstroom $I_{a\,max}$ zo groot mogelijk. Deze laatste wordt begrensd door de verzadigingstroom van de kathodes. Voor het beoogde doel — groot vermogen bij grote bandbreedte — moet men dus gebruik maken van buizen met een grote verzadigingstroom. Deze verkrijgt men, zonder te vervallen in een onpractisch groot gloeidraadvermogen, met behulp van kathodes van gethorieerd wolfraam; zoals onlangs in dit tijdschrift is uiteengezet, kan dit materiaal tegenwoordig, dank zij het gebruik van doeltreffende gasbinders, ook in buizen van groot vermogen worden toegepast [3]).

Bij het ontwerpen van een eindtrap doet zich de vraag voor of men triodes dan wel tetrodes zal kiezen. Een van de punten van overweging bij deze keuze is de invloed van de inwendige weerstand R_i. Beschouwen we twee gevallen, het ene met tetrodes, het andere met triodes, met dezelfde maximale anodedissipatie. Zulke buizen hebben ongeveer dezelfde uitgangscapaciteit, en deze grootheid bepaalt in hoofdzaak de capaciteit *C* in verg. (1). Ook de weerstandswaarde *R* onderstellen we in beide gevallen dezelfde, zodat volgens (1) de twee schakelingen gelijke resonantiebreedte hebben. De weerstand *R* nu kan worden opgevat als de parallelschakeling van drie takken: een weerstand R_a die de door de antenne gevormde nuttige belasting voorstelt, een weerstand R_{LC} die de verliezen in de trillingskring in rekening brengt, en een weerstand die de demping vertegenwoordigt welke de buizen teweegbrengen; bij instelling klasse B bedraagt deze laatste weerstand $2R_i$. Bij tetrodes is R_i zo hoog dat de invloed van de tak $2R_i$ kan worden verwaarloosd. Bij triodes echter heeft R_i een zodanige waarde dat R_a merkbaar hoger moet

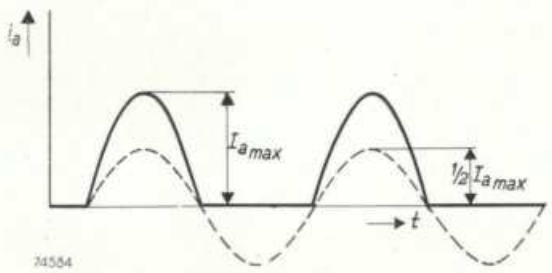


Fig. 4. Getrokken lijn: anodestroom i_a van één buis van een balansschakeling met instelling H.F. klasse B, als functie van de tijd *t*. Gestippeld: de eerste harmonische van i_a.

[3]) E. G. Dorgelo, Philips techn. T. **14**, 197-206, 1952 (No. 7).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn dan in het tetrodegeval, ten einde te voldoen aan de onderstelling van gelijke totale weerstanden R (de verlies-weerstanden $R_{L,C}$ onderstellen we eveneens even groot). De hogere waarde van R_i is gunstig, want ze betekent, bij even grote anodewisselstromen I_a, een groter vermogen $I_a^2 R_a$ in de antenne.

Tegenover dit voordeel van de triode staan twee nadelen. Ten eerste heeft R_i een waarde die tijdens het moduleren verandert; op deze kwestie komen we aan het eind van dit artikel nog terug. In de tweede plaats vergen triodes in het algemeen een groter stuurvermogen dan gelijkwaardige tetrodes.

Beide soorten buizen voldoen in de practijk. Tetrodes worden gebruikt in de televisiezender te Lopik. De hieronder beschreven proeven hebben alle betrekking op triodes.

Om experimenteel te kunnen nagaan of bij grote vermogens een resonantiekromme als die van fig. 2 kan worden verkregen en of tevens de modulatiekarakteristiek een gunstig verloop heeft, hebben wij een proefinstallatie gebouwd, bestaande uit een stuurtrap met voortrappen, een eindtrap en een belastingsweerstand (kunstantenne). De frequentie is veranderbaar van 48 tot 68 MHz, welk gebied de televisiekanalen 2, 3 en 4 omvat.

Wij zullen nu eerst enige beschouwingen geven aangaande de schakeling van de eindtrap, dan de genoemde onderdelen afzonderlijk bespreken en tot slot enige meetresultaten vermelden.

Schakeling van de eindtrap

Balansschakeling van de eindtrap van een televisiezender heeft het voordeel dat aan de ingang een punt van symmetrie aanwezig is, dat geen hoogfrequente spanning ten opzichte van aarde heeft. Op dit punt kan, bij moduleren in de eindtrap, de modulator rechtstreeks worden aangesloten, waarbij de belasting van de modulator tot het minimum beperkt blijft. Asymmetrische schakelingen daarentegen (met één buis of een aantal buizen parallel) leiden in het onderhavige frequentiegebied tot constructies (coaxiale systemen) waarbij de modulator wordt overbrugd door een aanzienlijke capaciteit, die er een extra-belasting voor vormt.

Volledigheidshalve zij vermeld dat de bedoelde capaciteit kan worden vermeden als men gebruik maakt van een kunstgreep, die, kort gezegd, bestaat in het verlengen van het coaxiale systeem met $^1/_4$ golflengte. Dit is practisch echter alleen uitvoerbaar bij voldoend korte golven (frequenties boven 100 MHz). Daar werkt men dan ook vaak met een asymmetrische schakeling.

Men dient echter nog te overwegen of men de buizen zal gebruiken in kathodebasis- dan wel in roosterbasisschakeling, dwz. of de kathodes dan wel de roosters het gemeenschappelijke punt van de ingangs- en de uitgangskring zullen vormen.

Een gebruikelijke schakeling voor kortegolfzenders met kleine bandbreedte is de kathodebasisschakeling (*fig. 5a*). Om te voorkomen dat de anodekring via de anode-roostercapaciteiten C_{ag} zodanig op de roosterkring terugwerkt dat de trap zelf gaat

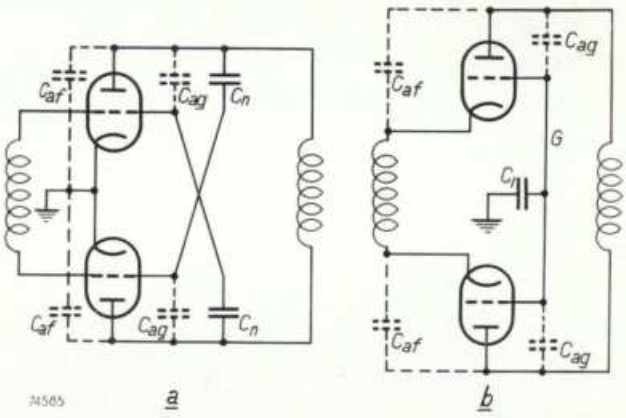


Fig. 5. Balanstrap, *a*) in kathodebasisschakeling, *b*) in roosterbasisschakeling. C_{ag} capaciteit tussen anode en rooster. C_{af} capaciteit tussen anode en gloeidraad. C_n neutrodynecondensator. C_1 capaciteit tussen aarde en de schermplaat G, waarmee de roosters zijn verbonden (in *b*).

oscilleren, is hier ieder rooster verbonden met de anode van de andere buis over een neutrodynecondensator C_n. Zolang de frequentie betrekkelijk laag is, wordt de terugwerking volkomen opgeheven indien $C_n = C_{ag}$.

In een op deze wijze geneutrodyniseerde kathodebasisschakeling bevinden zich parallel aan de spoel in de anodekring twee capacitieve takken, die ieder bestaan uit C_{ag} en C_n in serie. Daar $C_n = C_{ag}$, gedragen deze takken zich tezamen als één capaciteit $= C_{ag}$. Bij de roosterbasisschakeling (fig. 5*b*) daarentegen hebben we in hoofdzaak te maken met een aan de anodespoel parallelgeschakelde tak die bestaat uit de twee capaciteiten C_{ag} in serie en die zich dus gedraagt als een capaciteit $^1/_2 C_{ag}$. (In beide gevallen kan de geringe invloed van de capaciteit C_{af} tussen anode en gloeidraad buiten beschouwing blijven; C_{af} is ongeveer $^1/_{25} C_{ag}$.) Bij de roosterbasisschakeling is de bijdrage van de buizen tot de totale uitgangscapaciteit dus slechts ongeveer de helft van die bij de kathodebasisschakeling. Dit is vooral van belang bij grote zendbuizen, waarbij $^1/_2 C_{ag}$, resp. C_{ag}, het grootste deel van de totale uitgangscapaciteit vormt. Een kleine capaciteit is gunstig, ten eerste wat betreft de resonantiebreedte en de grootte van het vermogen (zie (2)), en ten tweede omdat, bij gegeven frequentie en gegeven amplitude van de hoogfrequente spanning, bij kleinere capaciteit de wisselstroom in de LC-kring kleiner is en de verliezen dus geringer zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

In de geneutrodyniseerde kathodebasisschakeling (fig. 5*a*) krijgt bij zeer hoge frequenties de zelfinductie van de verbindingen naar de neutrodyneconden-satoren invloed op de waarde die C_n moet hebben. De juiste waarde van C_n wordt dan afhankelijk van de frequentie, en wel dermate dat niet over de gehele brede frequentieband van een beeldzender een voldoende mate van neutrodynisering kan worden verkregen. Bij andere neutrodyneschakelingen is dit eveneens het geval.

Ook in dit opzicht is de roosterbasisschakeling veel gunstiger dan de kathodebasisschakeling, mits de buizen zodanig zijn geconstrueerd dat het rooster een goede afscherming vormt tussen de ingangs- en de uitgangskring. Het betreft hier niet alleen een electrische afscherming, maar ook een magnetische. Bij hoge frequenties loopt de stroom nagenoeg alleen door een dun laagje aan het oppervlak van de geleiders (huideffect). Van dit verschijnsel nu kan men, door de opstelling geschikt te kiezen, profijt trekken om de ingangs- en de uitgangskring zodanig gescheiden te houden dat de neutrodynecondensatoren niet meer nodig zijn. In *fig. 6* is schematisch een doeltreffende opstelling weergegeven. De ringvormige roosterdoorvoeringen van de buizen zijn hier bevestigd in een gemeenschappelijke metalen schermplaat. Dank zij het huideffect, loopt de ingangstroom — voor zover het de roosters en de schermplaat betreft — alleen door de bovenkant van de schermplaat en de binnenkant van de roosters, en de uitgangstroom alleen door de onderkant van de schermplaat en de buitenkant van de roosters. De beide kringen blijven gescheiden door het lichaam van schermplaat en roosters.

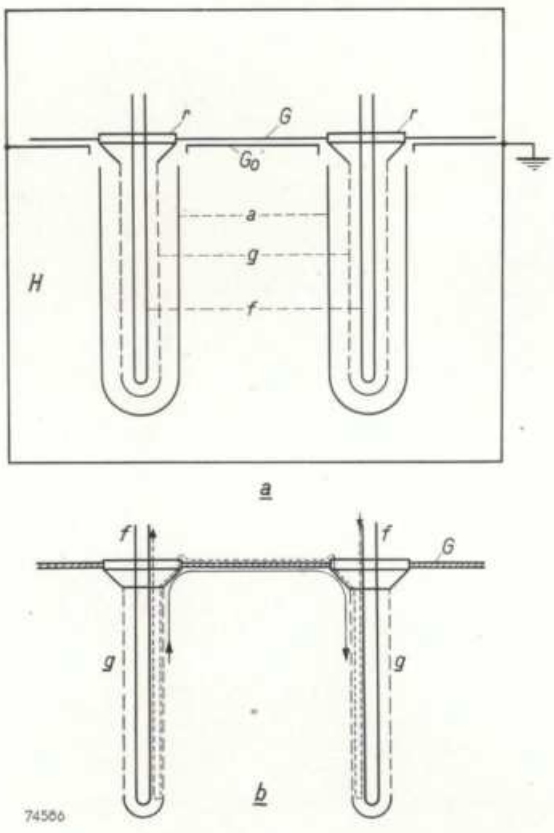


Fig. 6. *a*) Doorsnede over twee zendbuizen in roosterbasis-balansschakeling. *a* anodes, *g* roosters, *f* gloeidraden. *r* ringvormige roosterdoorvoeringen, verbonden met een gemeenschappelijke schermplaat *G*. De plaat G_0, die deel uitmaakt van de kast *H*, vormt met *G* een condensator (C_1 in fig. 5*b*). *b*) Loop van de hoogfrequente stromen door gloeidraden, schermplaat en roosters. De ingangstroom loopt door een huidje langs de gestippelde pijl, de uitgangstroom door een huidje langs de getrokken pijl. De enige koppeling tussen de kringen die nog overblijft, komt tot stand via de mazen van het rooster.

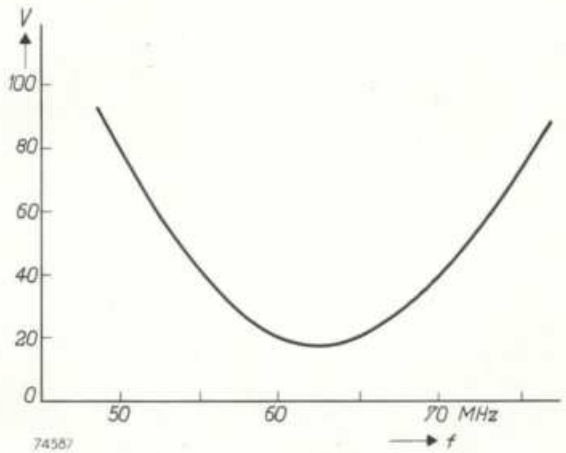


Fig. 7. „Doorstraling": gemeten spanning V tussen de anodes van de eindtrap (op relatieve schaal) als functie van de frequentie f, bij constante ingangspanning en gedoofde gloeidraden.

Onvolkomenheden in deze afscherming ontstaan in hoofdzaak als gevolg van de aanwezigheid van de mazen in het rooster. Hierdoor is er een zekere capaciteit C_{af} tussen anode en gloeidraad en treedt tevens wederzijdse inductie tussen de stroomkringen op; beneden een bepaalde frequentie overweegt de koppeling over C_{af}, boven deze frequentie overweegt de koppeling over de wederzijdse inductie. Dit komt tot uiting bij de zg. doorstralingsproef: tussen de kathodes, die men koud laat, zet men een wisselspanning van hoge, regelbare frequentie en constante amplitude, en men meet de wisselspanning die als gevolg van de onvolkomen afscherming aan de uitgangskring ontstaat, als functie van de frequentie. Voor de eindtrap van onze proefinstallatie, die volgens fig. 6 is gebouwd, geeft *fig. 7* het resultaat van de doorstralingsproef. Bij 62 MHz treedt een minimum op; daar compenseert de invloed van C_{af} die van de wederzijdse inductie. (Het minimum blijft

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

echter groter dan nul, als gevolg van verliezen.) Over het gehele frequentiegebied van 48 tot 68 MHz (kanalen 2, 3 en 4) is de doorstraling zo gering dat de installatie stabiel werkt, zonder dat verdere maatregelen behoefden te worden genomen.

Daar de roosters een negatieve voorspanning nodig hebben, kan men ze niet rechtstreeks met de kast verbinden, maar moet dat geschieden over een capaciteit. Zoals in fig. 6 is te zien, wordt deze capaciteit gevormd door de schermplaat en een tweede metalen plaat, die deel uitmaakt van de kast. De platen zijn gescheiden door een vast diëlectricum als mica of polytheen.

Hoewel onze proefinstallatie niet is ingericht op moduleren, willen we er toch enige woorden aan wijden.

Een inrichting volgens fig. 6 is geschikt voor het werken als versterker, waarbij dus wordt gemoduleerd in een voortrap. De gemoduleerde hoogfrequente stuurspanning komt tussen de kathodes van de eindbuizen te staan.

Bij modulatie in de eindtrap komt in deze schakeling het videosignaal te staan tussen de kathodes en aarde. Dit heeft het nadeel dat de modulator zeer zwaar wordt belast, namelijk niet alleen met de buiscapaciteit, maar bovendien met de capaciteit van de gloeistroomwikkelingen. Daarom wordt soms de voorkeur gegeven aan de schakeling van *fig. 8a*. De roosters zijn hier niet meer rechtstreeks met elkaar en capacitief met aarde verbonden, maar ze zijn onderling verbonden door twee condensatoren in serie (twee wegens de symmetrie) en een smoorspoel. Deze laatste heeft een middenaftakking, waaraan het videosignaal wordt toegevoerd. Fig. 8*b* laat zien hoe deze schakeling in de practijk kan worden verwezenlijkt.

Wegens het ontbreken van een doorlopende schermplaat zijn de stroomweg van de ingangs- en die van de uitgangskring hier niet volledig gescheiden, wat resulteert in een zekere koppeling. Deze kan, tezamen met de magnetische koppeling via de mazen van het rooster, in het schema (fig. 8*a*) worden voorgesteld door een zelfinductie L' in serie met ieder rooster. Als vervangschema voor elke helft van de schakeling geldt nu fig. 8*c*, waarin ook de buiscapaciteiten (C_{ag}, C_{gf} en C_{af}) zijn opgenomen. Men kan aantonen dat de koppeling tussen de ingangs- en de uitgangskring nul is, indien

$$X' = \frac{-X_{fg}\,X_{ag}}{X_{fg} + X_{ag} + X_{af}},$$

waarin $X' = \omega L' - \frac{1}{\omega C'}$, $X_{fg} = \frac{1}{\omega C_{fg}}$, enz. (met $\omega = 2\pi f$).

Aan deze betrekking kan worden voldaan door C' een bepaalde waarde te geven. Deze „neutrodynisering" is weer afhankelijk van de frequentie, en wel dermate dat stabilisatie alleen is te verkrijgen in een smal frequentiegebied. In Engeland, waar de televisie werkt met 405 lijnen en de frequentieband dus vrij smal is, wordt dit systeem inderdaad toegepast, maar voor zenders met 625 of meer lijnen is het wegens de grote „selectiviteit" van de neutrodynisatie minder geschikt.

Bij het tegen elkaar afwegen van de voor- en nadelen van de kathodebasis- en de roosterbasisschakeling moeten we ook de stuurtrap in de beschouwingen betrekken. De stuurtrap voor een kathodebasisschakeling levert een vermogen dat uitsluitend dient ter dekking van de roosterdissipatie in de eindbuizen, van de dissipatie in de roosterweerstanden en van de verliezen in de ingangskring.

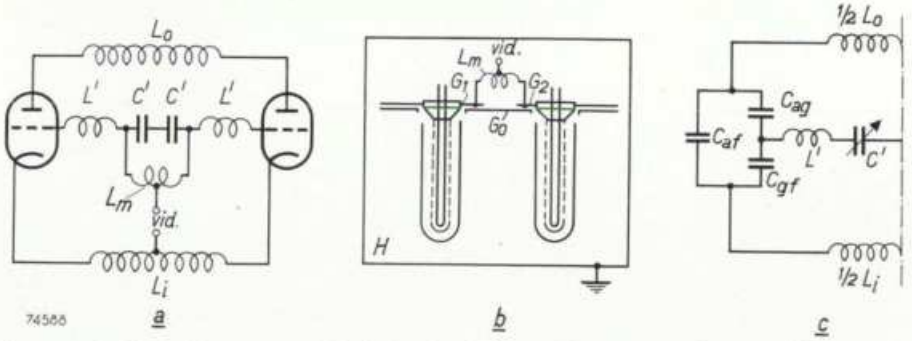


Fig. 8. *a*) Schakeling voor modulatie in de eindtrap. De roosters zijn capacitief met elkaar verbonden (C'-C') en het videosignaal *vid* wordt toegevoerd via een smoorspoel (L_m) met middenaftakking. L_i ingangskring, L_o uitgangskring. L' parasitaire zelfinducties. *b*) Wijze waarop de schakeling (*a*) kan worden uitgevoerd. De capaciteiten C' worden gevormd door de schermplaten G_1 en G_2 enerzijds en de (niet met de kast H verbonden) plaat G_0 anderzijds.
c) Vervangschema voor één helft van de schakeling. C_{ag}, C_{gf} en C_{af} buiscapaciteiten. L' parasitaire zelfinductie. Door C' een bepaalde waarde te geven kan men de koppeling tussen de kringen nul maken.

Bij de roosterbasisschakeling echter moet de stuurtrap in staat zijn, bovendien nog een zeker vermogen te leveren dat doorgegeven wordt naar de belasting van de eindtrap. In *fig. 9*, die de eenvoudigste vorm van roosterbasisschakeling weergeeft, is dit verduidelijkt. De wisselspanning over de belastingsweerstand R is de som van de ingangswisselspanning V_i en de wisselspanning V_a over de buis. Als I_a de anodewisselstroom is en I_a, V_i en V_a effectieve waarden zijn, is het afgegeven vermogen $I_a(V_i + V_a)$,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en hiervan moet, behalve de reeds genoemde verliezen, het gedeelte $I_a V_i$ worden opgebracht door de stuurtrap. Deze moet dus groter zijn dan bij een eindtrap in kathodebasisschakeling. Dit nadeel weegt echter niet op tegen de bovengenoemde voordelen van de roosterbasisschakeling (kleinere uitgangscapaciteit en grotere stabiliteit).

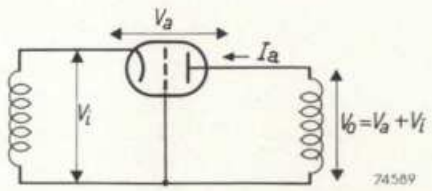


Fig. 9. Versterktrap in roosterbasisschakeling. De uitgangswisselspanning is de som van de ingangswisselspanning V_i en de wisselspanning V_a tussen anode en gloeidraad. Dientengevolge komt het aan de ingang toegevoerde vermogen, afgezien van verliezen, ten goede aan de uitgangskring.

Lechersystemen

Trillingskringen voor metergolven kunnen het best worden uitgevoerd als lechersystemen, hetzij als tweedraadsleiding, hetzij als coaxiale leiding. Beide zijn in onze opstelling gebruikt. De tweedraadsleidingen zijn te zien in de schematische voorstelling van de eindtrap, *fig. 10*. Hierin is G de in het voorgaande besproken schermplaat, waaraan de roosters zijn verbonden. De kathodes bevinden zich aan het ene eind van een tweedraadsleiding (Le_i), die de ingangskring vormt en aan het andere eind door de kortsluitbrug (B_1) is kortgesloten. Door de relatief grote ingangscapaciteit van de buizen vormen de gloeidraden zelf een niet te verwaarlozen deel van de ingangskring en zou derhalve het gedeelte buiten de buizen zeer kort worden. Op een geschikt punt van dit laatste gedeelte moet de aandrijvende stuurtrap (S) worden aangesloten; dit punt moet op voldoende afstand van de kortsluitbrug liggen. Ten einde te voorkomen dat het aftakpunt ergens op de gloeidraad binnen de buizen zou komen te liggen (en dus onbereikbaar zou zijn), is de ingangskring met een halve golflengte verlengd tot ongeveer $^3/_4$ golflengte. Afgestemd wordt door verplaatsen van de kortsluitbrug.

De gloeistroomtransformatoren (T_{f1}, T_{f2}) zijn aangesloten via een coaxiale leiding van $^1/_4$ golflengte (Lef_1, Lef_2). De twee gloeistroomleidingen van iedere buis vormen samen de binnengeleider en liggen in een met de kast verbonden pijp, die als buitenge-

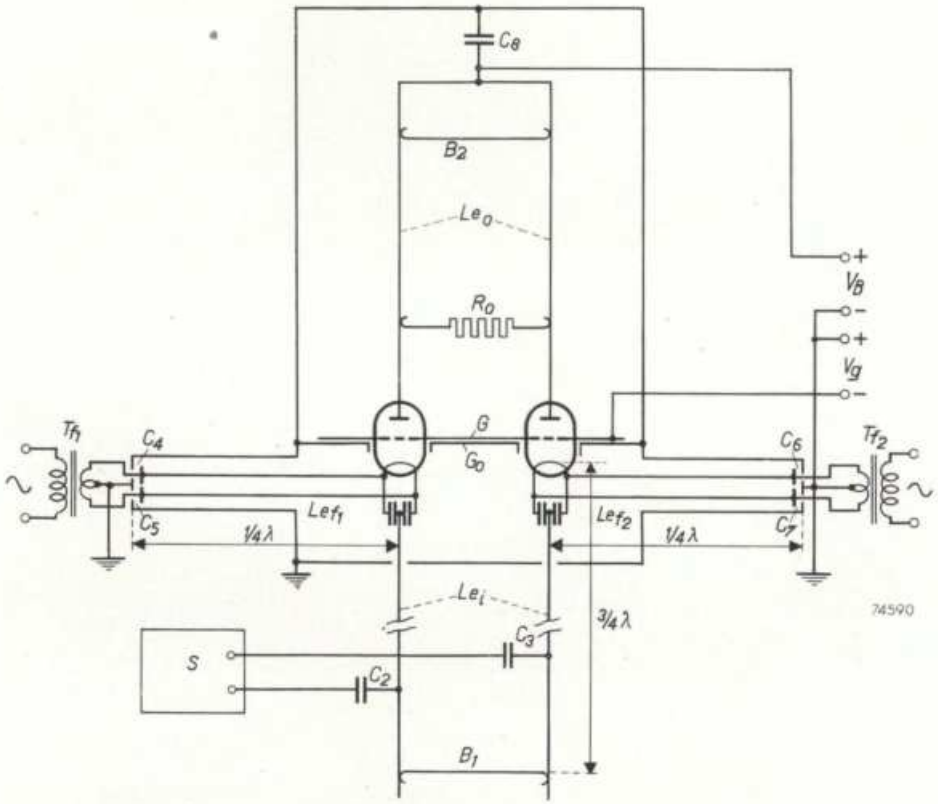


Fig. 10. Schema van de eindtrap. S stuurtrap, over de condensatoren C_2 en C_3 gekoppeld met het ingangslechersysteem Le_i, met afstembrug B_1. Lef_1, Lef_2 lechersystemen waarover de transformatoren T_{f1} en T_{f2} de gloeidraden voeden. C_4-C_5 en C_6-C_7 capacitieve afstembruggen van deze lechersystemen. G schermplaat, G_0 geaarde plaat (vgl. fig. 6). Le_o uitgangslechersysteem, met afstembrug B_2 en verplaatsbare belastingsweerstand R_0. C_8 overbruggingscondensator. V_g roostergelijkspanning, V_B voedingspanning van de anodekring.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

leider fungeert. Op $^1/_4$ golflengte afstand van de gloeidraad zijn de gloeistroomleidingen capacitief met de buitengeleider verbonden (condensatoren C_4-C_5 en C_6-C_7). De secundaire wikkeling van de gloeistroomtransformatoren is geaard.

Een vierde lechersysteem vormt de anode- of uitgangskring. Hier is de situatie ingewikkelder, aangezien de buizen een integrerend deel van dit systeem uitmaken. Elk van de zendbuizen is omgeven door een cilinder (C in *fig. 11a*) van messing.

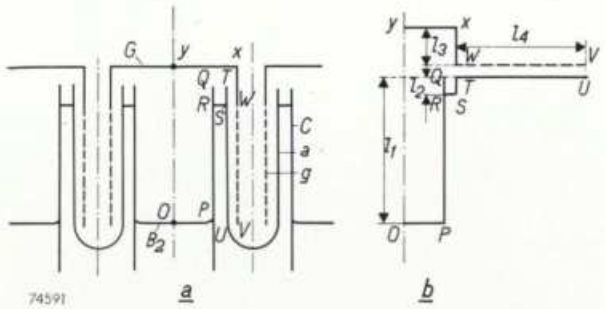


Fig. 11. *a*) Uitgangslechersysteem. *g* rooster. *a* anode. *C* metalen cilinder om de anode heen, met verplaatsbare afstembrug B_2. *G* schermplaat.
b) Het samenstel van tweedraads- en coaxiale leidingen waarmee men hier heeft te doen. Lengten l_1, l_2, l_3 en l_4. De punten gemerkt met de letters *O*, *P*, *Q*, ... *X*, *Y* corresponderen met die in (*a*).

Deze twee cilinders fungeren samen als een kort stuk tweedraadsleiding, die door een verplaatsbare brug (B_2 in fig. 10 en fig. 11*a*) is kortgesloten. Zoals bekend, gedraagt zulk een leiding zich als een zelfinductie [4]). Door verplaatsing van de brug kan men deze zelfinductie, en daarmee de eigen frequentie van de kring, variëren. Naar we boven hebben gezien, is de effectieve capaciteit in de kring in hoofdzaak $^1/_2 C_{ag}$, daar de twee anode-roostercapaciteiten in serie zijn geschakeld. (Strikt genomen, is C_{ag} geen geconcentreerde capaciteit, maar de vervangingswaarde voor de open coaxiale leiding die wordt gevormd door de anode en het rooster.) Daarbij komt nog de capaciteit van de tweedraadsleiding die wordt gevormd door de twee cilinders, doch daar deze leiding kort is in vergelijking met de golflengte λ (ongeveer $^1/_{15}\,\lambda$), is deze capaciteitsbijdrage verwaarloosbaar klein.

Het samenstel van lechersystemen die de anodekring vormen, is schematisch voorgesteld in fig. 11*b*. Men kan onderscheiden: een kortgesloten tweedraadsleiding (gevormd door de twee cilinders en de kortsluitbrug) ter lengte van l_1, twee kortgesloten coaxiale leidingen ter lengte van l_2 en l_3, en een open leiding — in de figuur getekend als tweedraadsleiding — gevormd door rooster en anode, en met de lengte l_4. Volgens de formules (19) en (24) van het in noot [4]) aangehaalde artikel geldt — mits de lengte l klein is ten opzichte van de golflengte λ, en dat is hier het geval — voor de ingangsimpedantie Z_k van een kortgesloten leiding:

$$Z_k = \mathrm{j}\zeta \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda},$$

en voor de ingangsimpedantie Z_0 van een open leiding:

$$Z_0 = -\mathrm{j}\,\zeta \operatorname{cotg} 2\pi \frac{l}{\lambda}.$$

Hierin is ζ de karakteristieke impedantie van de leiding, een reële en positieve grootheid, die een bekende functie van de afmetingen is. Uit deze formules blijkt dat de kortgesloten leiding zich inderdaad gedraagt als een zelfinductie en het open systeem als een capaciteit.

De eigen frequenties van een electrisch systeem zijn die frequenties waarbij stroom kan lopen zonder dat er een electromotorische kracht werkzaam is, dus waarbij de som van alle reactanties nul is. Dit toepassende op het in fig. 11*b* geschetste systeem, vindt men:

$$\mathrm{j}\,\zeta_1 \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_1}{\lambda_{res}} + \mathrm{j}\,\zeta_2 \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_2}{\lambda_{res}} + \mathrm{j}\,\zeta_3 \operatorname{tg} 2\pi \frac{l_3}{\lambda_{res}} - \\ -\mathrm{j}\,\zeta_4 \operatorname{cotg} 2\pi \frac{l_4}{\lambda_{res}} = 0.$$

Deze vergelijking kan dienen om bij gegeven afmetingen een schatting te maken van de eigen golflengten λ_{res}.

De kromme in *fig. 12* geeft weer, hoe de gemeten resonantiefrequentie van de anodekring afhangt van de plaats van de kortsluitbrug. Men ziet dat afgestemd kan worden op de televisiekanalen 2, 3 en 4,

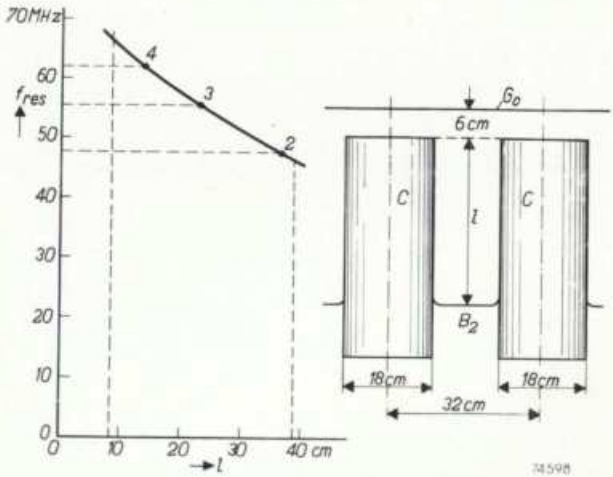


Fig. 12. Resonantiefrequentie f_{res} van het uitgangslechersysteem als functie van de afstand l van de afstembrug B_2 tot de bovenrand van de cilinders *C* (zie bijfiguur). De punten *2*, *3* en *4* corresponderen met de draag- golffrequentie van de televisiekanalen 2, 3 en 4.

waarvan de beelddraaggolf de frequentie 48,25, 55,25 resp. 62,25 MHz heeft. Zoals boven werd besproken (fig. 2), is het voordelig, de resonantiefrequentie van de anodekring wat hoger te leggen.

[4]) Zie voor deze en andere eigenschappen van lechersystemen het artikel van C. G. A. von Lindern en G. de Vries, Philips techn. T. **6**, 241-250, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Constructiedetails

Eindtrap

In de eindtrap worden twee buizen type TBW 12/100 gebruikt. Dit type is onlangs in dit tijdschrift uitvoerig beschreven (zie het in noot [3]) aangehaalde artikel). Het heeft een roosterconstructie die de buis geschikt maakt voor roosterbasisschakeling, een kathode van gethorieerd wolfraam en een met water gekoelde anode. De buis is ontwikkeld voor frequenties tot 30 MHz, maar werd bij onze proeven met succes gebruikt op frequenties tot ongeveer 70 MHz.

Fig. 13 is een foto van de eindtrap. Men ziet de twee cilinders van de uitgangskring met de verplaatsbare afstembrug.

Fig. 14 is een doorsnede door een van de cilinders en de erin geplaatste buis. Het gedeelte van het rooster dat zich boven de anodelas bevindt, is een cilinder zonder openingen in de wand en de anode reikt tot een eindweegs boven deze las; aldus is een labyrinth ontstaan, dat voorkomt dat de glazen

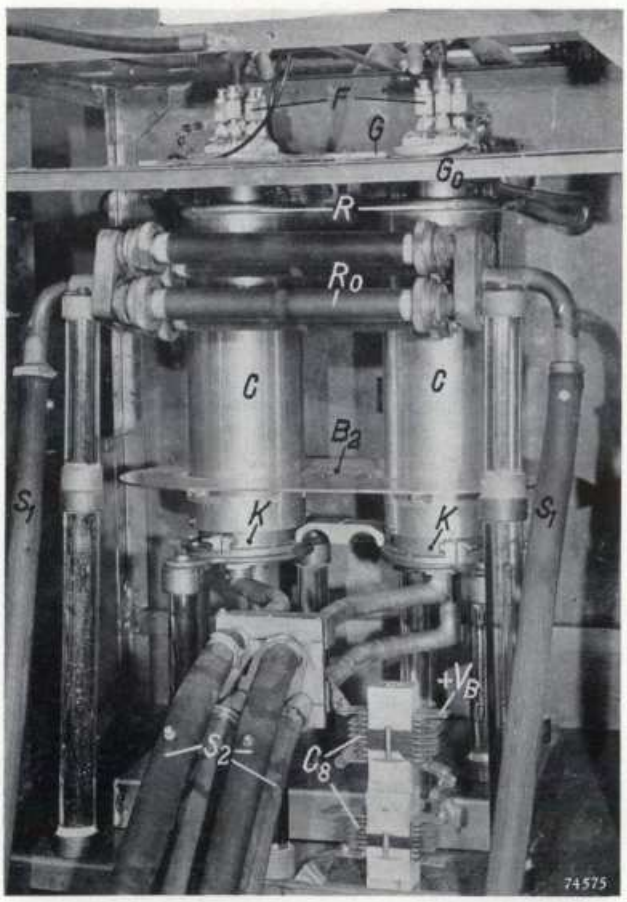


Fig. 13. Foto van de eindtrap. *F* gloeidraadaansluitingen van de buizen (type TBW 12/100). *G* schermplaat, verbonden met de roosters en door isolatiemateriaal gescheiden van de met de kast verbonden plaat G_0 (zie fig. 10). *R* ringen met gaatjes, waardoor koellucht op het glazen gedeelte van de zendbuizen wordt geblazen. *C* cilinders van het uitgangslechersysteem, met afstembrug B_2 en belastingsweerstand R_0, beide verplaatsbaar. *K* koeler. S_1, S_2 slangen voor het koelwater van de belastingsweerstand resp. van de buizen. $+V_B$ aansluiting voor de voedingspanning. C_8 overbruggingscondensator.

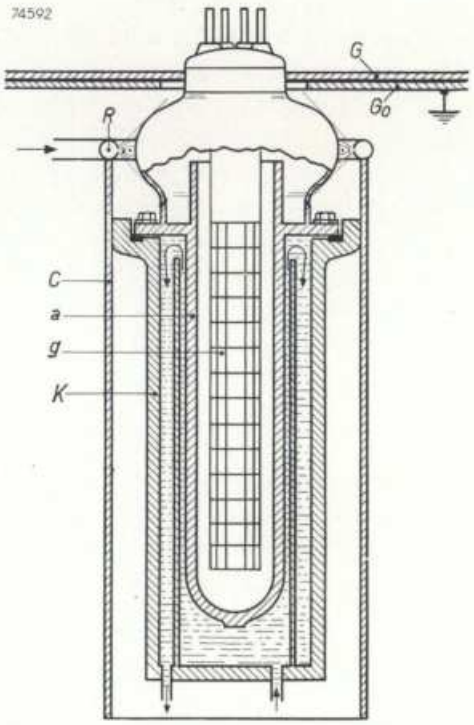


Fig. 14. Doorsnede over een van de buizen (TBW 12/100) in de eindtrap. *a* anode, *g* rooster. Voor de betekenis van de overige letters zie fig. 13.

wand door electronen wordt getroffen. Om het glazen gedeelte bevindt zich de bij de TBW 12/100 gebruikelijke ring (*R*) met gaatjes, waaruit koellucht op de anode- en de roosterlas wordt geblazen. De coaxiale cilinder loopt tot deze blaasring door, wat de volgende voordelen heeft:

1) Daar even hoog gelegen delen van cilinders en anode gelijke potentiaal hebben, bevindt de anodelas zich in een veldvrije ruimte, zodat in het aan de las grenzende glas geen diëlectrische verliezen optreden en dus ook geen verwarming.

2) De grotere lengte van de cilinders geeft meer gelegenheid tot verplaatsing van de belastingsweerstand (zie hieronder).

3) De wederzijdse stroomverdringing („proximity effect") bij de anodelas wordt er minder door.

Dit laatste punt kan als volgt worden toegelicht: Zoals bekend, treedt bij hoge frequenties het huideffect op, dat zich uit als een vergroting van de weerstand. Het is een gevolg van „stroomverdringing" door het magnetisch veld van de stroom zelf. Wederzijdse stroomverdringing treedt op bij twee (of meer) geleiders, doordat de stroomverdeling van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de ene geleider invloed ondervindt van de magnetische velden van de andere [5]). De stroomdichtheid wordt dan groter aan de naar elkaar toe gekeerde zijden van de geleiders en dit komt tot uiting in een extra-vergroting van de weerstand. Bij twee naast elkaar opgestelde buizen nu zou, zonder de afschermende werking van de cilinders, de hoogfrequente anodestroom niet gelijkmatig over de omtrek van de anode verdeeld zijn, maar sterk geconcentreerd aan de naar elkaar toe gekeerde zijden van de anodes. Hierdoor zou gevaar ontstaan van plaatselijke oververhitting van de anodelassen. De beschreven verlenging van de cilinders maakt de stroomverdeling veel gelijkmatiger. Weliswaar treedt nu wederzijdse stroomverdringing in de cilinders zelf op, maar dit kan geen kwaad.

Langs de cilinders is niet alleen de afstembrug verplaatsbaar, maar ook de belastingsweerstand (R_0 in de fig. 10 en 13). De spanning tussen even hoog gelegen zones van de cilinders neemt namelijk van beneden naar boven toe, zodat de weerstand een grotere belasting gaat vormen naarmate men hem verder omhoog schuift. Aldus is met een constante weerstand een continu instelbare belasting verkregen.

De belastingsweerstand bestaat uit vier keramische buizen (fig. 13), waarop door sintering een laag kool is aangebracht en waar koelwater doorheen stroomt. Per buis kan 25 kW worden afgevoerd bij een waterstroom van 25 liter/min. De vier weerstanden zijn parallelgeschakeld. Daar de lengte slechts ongeveer 0,1 λ is, is de weerstandswaarde (120 Ω) nagenoeg onafhankelijk van de frequentie.

Oscillator en voortrappen

Wegens de vereiste constantheid van de draaggolffrequentie wordt bij een televisiezender deze frequentie steeds bepaald door een oscillator met kwartskristal. Tussen deze oscillator van gering vermogen en de eindtrap zijn dan een aantal trappen hoogfrequentieversterking nodig. Voor onze installatie echter moest de frequentie veranderbaar zijn. Daarvoor hadden we in principe de stuurtrap, die de eindtrap aandrijft, kunnen uitvoeren als oscillator van regelbare frequentie. Voor een eindtrap van 100 kW is echter een stuurvermogen van 15 tot 20 kW nodig, en het is niet eenvoudig een oscillator voor zulk een vermogen zo te construeren dat hij in het gehele frequentiegebied van 48 tot 68 MHz vrij is van parasitaire trillingen en een redelijk constante uitgangspanning levert. Veel gunstiger is de zoëven genoemde methode met een oscillator van klein vermogen, gevolgd door enige trappen hoogfrequentieversterking. Deze methode hebben wij toegepast, uiteraard met een oscillator van regelbare frequentie; zie het blokschema *fig. 15*.

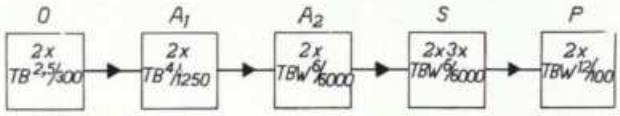


Fig. 15. Blokschema van de installatie. *O* oscillator met regelbare frequentie. A_1 en A_2 voortrappen. *S* stuurtrap. *P* eindtrap. Ingeschreven zijn het aantal en het typenummer van de in iedere trap gebruikte buizen.

De oscillator (*O*) werkt met twee buizen TB 2,5/300 [6]) in balansschakeling. Voor het veranderen van de frequentie kan men hetzij de capaciteit, hetzij de zelfinductie variëren. Tussen de roosters bevindt zich een *LC*-kring met variabele *C*, tussen de anodes een *LC*-kring met variabele *L* (variometer). Op deze wijze wordt een uitgangspanning verkregen die over het gehele frequentiegebied nagenoeg constant is. De oscillator heeft een in frequentie geijkte schaal.

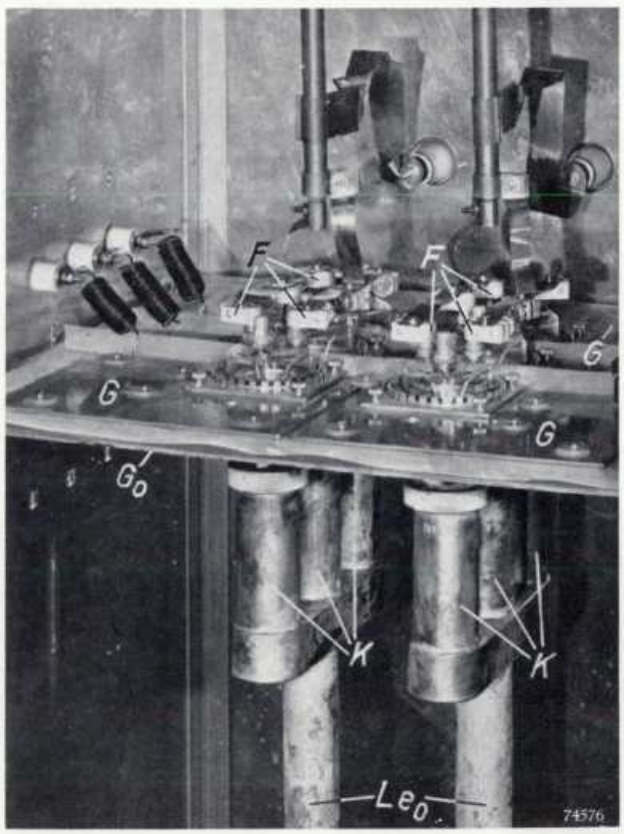


Fig. 16. Inwendige van de stuurtrap, in roosterbasisbalansschakeling met aan iedere zijde drie buizen TBW 6/6000 parallel. *F* gloeidraadaansluitingen. *G* schermplaat. G_0 met de kast verbonden plaat. *K* koelers. Le_0 uitgangslechersysteem.

[5]) Zie bijv. Philips techn. T. **6**, 220, 1941, of F. E. Terman, Radio Engineers' Handbook, McGraw-Hill, New York 1943, blz. 36-37.

[6]) De zendtriode TB 2,5/300 is beschreven in Philips techn. T. **10**, 273-281, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tussen de oscillator en de stuurtrap zijn twee hoogfrequentieversterkers, of sub-stuurtrappen, nodig (A_1 en A_2 in fig. 15). Zij werken met twee buizen TB 4/1250 resp. TBW 6/6000 in roosterbasisbalansschakeling [7]).

De eigenlijke stuurtrap (S, fig. 15) werkt eveneens in roosterbasisbalansschakeling, met drie parallelgeschakelde buizen TBW 6/6000 aan elke zijde (*fig. 16*). Toe- en afvoer van het koelwater geschiedt door concentrische leidingen, waarvan de buitenste tevens het uitgangslechersysteem vormen, vanwaaruit de eindtrap wordt aangedreven. Evenals in de eindtrap wordt gebruik gemaakt van een schermplaat, die met de roosters is verbonden en capacitief is geaard. (Dat, zoals in fig. 16 is te zien, iedere buis is voorzien van een eigen schermplaat, heeft alleen deze reden, dat het daardoor mogelijk is, van elke buis afzonderlijk de roosterstroom te meten.)

Meetinrichtingen

De meting van het uitgangsvermogen als functie van de frequentie moet geschieden bij constante ingangspanning van de eindtrap. Gemeten moeten dus worden de ingangspanning en het uitgangsververmogen; de frequentie is, zoals gezegd, afleesbaar op de schaal van de oscillator.

Meting van de ingangspanning

In *fig. 17a* is schematisch voorgesteld hoe de ingangspanning kan worden gemeten. Via de capaciteit tussen een van de ingangsleidingen (Le_i) en een koperen opneemplaatje (D), dat in de nabijheid is opgesteld, ontstaat op dit plaatje een wisselspanning. Deze wordt, door tussenkomst van een germaniumdiode (Ge) en een afvlakweerstand (R) en -condensator (C), in relatieve maat gemeten met behulp van een gelijkstroommeter (microampèremeter).

De moeilijkheid bij een dergelijke meting is het vermijden van de storende invloeden van de sterke magnetische en electrische wisselvelden die in de buurt van de eindtrap heersen. Hoe deze storingen zijn voorkomen blijkt uit fig. 17*b*, waarin de uitvoering van de meetinrichting is geschetst. Het opneemplaatje bevindt zich in of bij de opening van een geaard koperen pijpje, dat de germaniumdiode, de weerstand en de condensator bevat; al naar de gewenste gevoeligheid kan men het plaatje meer of minder ver buiten het pijpje uit laten steken of erin terugtrekken. Een coaxiaal snoer verbindt deze opnemer met de microampèremeter, die tegen beschadiging door hoogfrequente stroom is beschermd door een metalen omhulsel.

Een punt van overweging is ook, in hoeverre de meting afhangt van de frequentie. Bij verandering van de frequentie verplaatsen de spanningsmaxima en -minima zich immers langs de lecherleiding en verandert dus de uitslag van de meter. Nu varieert de spanning in de richting van de lecherleiding sterk in de buurt van een minimum, daarentegen slechts weinig in de omgeving van een maximum. Het is dus gunstig de opnemer op te stellen bij een maximum. Doet men dit, dan kan men, binnen het frequentiegebied van één kanaal, de fout door het zich verplaatsen van het maximum verwaarlozen. Bij overgaan op een ander kanaal echter moet men even de plaats van het nieuwe maximum opzoeken.

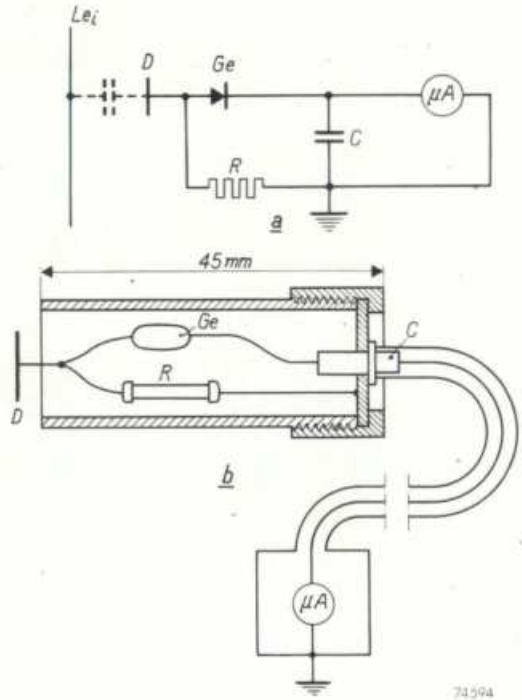


Fig. 17. *a*) Schema voor het meten van de ingangswisselspanning V_i. Le_i een der geleiders van het ingangslechersysteem. D opneemplaatje. Ge germaniumdiode. R en C afvlakweerstand resp. -condensator. μA microampèremeter. *b*) Uitvoering van de meetinrichting. De onderdelen D, Ge, R en C zijn ter afscherming ondergebracht in een geaard koperen pijpje. De meter is aangesloten met een coaxiaal snoer en zelf ook afgeschermd.

Zoals gezegd, is de meting alleen relatief, en dit is ook voldoende indien het er alleen om te doen is, de ingangspanning constant te houden. Met weinig moeite echter kan de inrichting worden geijkt, zodat men op de microampèremeter rechtstreeks de wisselspanning tussen gloeidraad en rooster kan aflezen. Daartoe maken we gebruik van het feit dat er juist roosterstroom begint te lopen wanneer de

[7]) De TB 4/1250 is een buis analoog aan de TB 2,5/300, doch voor groter vermogen; de buis TBW 6/6000 is analoog aan de TBW 12/100, doch voor kleiner vermogen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

amplitude van de wisselspanning tussen gloeidraad en rooster, daar waar deze spanning het grootst is, (bijna) gelijk is aan de gelijkspaninng tussen deze electrodes. Deze gelijkspanning (V_g in fig. 10) is regelbaar en rechtstreeks te meten. Het optreden van de roosterstroom kan worden geconstateerd op een gelijkstroommeter in serie met de spanningsbron V_g.

Meting van het uitgangsvermogen

Bij een constant waterverbruik is de temperatuurverhoging die het koelwater in de belastingsweerstand R_0 ondergaat, een maat voor het vermogen P_0 dat in R_0 wordt ontwikkeld. Daar de temperatuur van het nog niet verwarmde water als constant mag worden beschouwd, kan de thermometer die de temperatuur van het afvloeiende koelwater meet, in kW worden geijkt, zodat P_0 rechtstreeks afleesbaar is.

Resultaten die met de installatie zijn verkregen

Gebleken is dat onze proefinstallatie continu een vermogen van 100 kW kan leveren. De vraag of een dergelijke installatie — gecompleteerd met een modulator, een antenne enz. — nu ook geschikt is als televisiezender met 100 kW topvermogen, kan pas bevestigend worden beantwoord nadat de resonantiebreedte groot genoeg en de modulatiekarakteristiek voldoende lineair zijn bevonden. Meetresultaten dienaangaande worden hieronder vermeld.

Wij hebben ons gebaseerd op de norm van het C.C.I.R., die negatieve modulatie voorschrijft [8]). Hierbij is de antennestroom het grootst (100%) tijdens de synchronisatiesignalen; hij daalt tot 75% bij het zwartniveau (kleinste beeldhelderheid) en tot 10% bij het witniveau (grootste beeldhelderheid). Bij het zwartniveau bedraagt het uitgezonden vermogen dus $0{,}75^2 = 56\%$ van het topvermogen. Daar de buizen TBW 12/100, zoals gezegd, 100 kW continu kunnen leveren, heeft men bij 100 kW in de synchronisatiepieken dus een zeer ruime veiligheidsmarge.

Resonantiekrommen

Gemeten is de temperatuurverhoging $\Delta\vartheta$ van het koelwater van de belastingsweerstand, als functie van de frequentie in een gebied rondom de resonantiefrequentie. Dit gebeurde bij constante afstemming van de anodekring en constante ingangspanning en bij verschillende waarden van de belasting. Deze laatste werd gevarieerd door de weerstand R_0 te verschuiven.

[8]) Zie de in noot [1]) aangehaalde publicatie, of bijv. Philips techn. T. **13**, 295 (fig. 1), 1952 (No. 10).

Fig. 18a en *b* geven de „antennestroom" I_{ant} ($\sim \Delta\vartheta$) als functie van de frequentie, voor televisiekanaal 2 resp. 4. Bij resonantie was I_{ant} 75% van de waarde die bij 100 kW behoort, zodat deze figuren corresponderen met het zwartniveau van een zender met 100 kW topvermogen. Het blijkt dat in een frequentiegebied van 6 MHz I_{ant} minder dan 1 dB beneden de resonantiewaarde blijft, zodat aan de eis die we hadden gesteld, is voldaan.

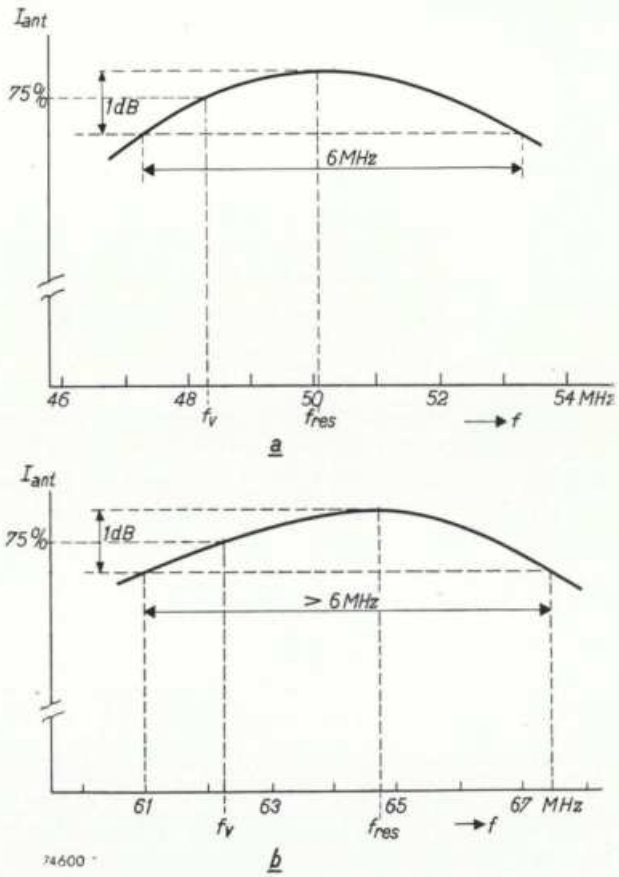


Fig. 18. Resonantiekromme $I_{ant} = f(f)$ van de eindtrap, afgestemd op (*a*) televisiekanaal 2, (*b*) televisiekanaal 4. In een frequentiegebied van 6 MHz blijft I_{ant} minder dan 1 dB beneden de maximale waarde.

Zoals boven werd besproken, is deze eis nogal streng, maar dat is o.a. om de volgende reden ook nodig. Bij modulatie wordt de anodegelijkstroom kleiner dan de waarde die bij het zwartniveau behoort. Dit gaat gepaard met een toenemen van de inwendige weerstand R_i van de buizen. De demping door de buizen neemt derhalve af, hetgeen de resonantiebreedte verkleint. Bij dieper worden van de modulatie neemt de resonantiebreedte dus af.

Modulatiekarakteristieken

In *fig. 19* zijn, als functie van de ingangswisselspanning V_i, verschillende gemeten stromen uitgezet, en wel de „antennestroom" I_{ant}, de anodegelijkstroom I_a en de roostergelijkstroom I_g. Bij $I_{ant} = 100\%$ is $P_0 = 100$ kW. De kromme voor I_{ant} is de modulatiekarakteristiek voor het geval van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

modulatie in een voortrap (gemoduleerde ingangspanning). De analoge krommen voor modulatie in de eindtrap (V_i constant, V_g variabel) vindt men in *fig. 20*.

Voor een goede gradatie van het ontvangen beeld (gamma) moet in beide gevallen de kromme voor I_{ant} tussen het zwart- en het witniveau (75% en 10%) behoorlijk lineair zijn. Hoewel over toelaatbare afwijkingen van de lineariteit nog niets officieel is vastgesteld, mag wel worden aangenomen dat de afgebeelde krommen voldoende lineair zijn. (Te verwachten is dat de eisen minder streng zullen uitvallen dan die welke bij geluidsoverbrenging worden gesteld, daar het oog veel minder gevoelig is voor niet-lineariteit dan het oor.) Indien nodig, kan men de modulator een zodanige niet-lineaire karakteristiek geven dat daardoor de niet-lineariteit van de modulatiekarakteristiek zo goed mogelijk wordt gecompenseerd.

Uit de anodestroomkrommen in fig. 19 en 20 blijkt dat bij $P_0 = 100$ kW een anodestroom van 32 A wordt opgenomen, bij 6500 V gelijkspanning dus een vermogen van 210 kW. De roosterstroomkrommen laten zien dat de stuurtrap roosterstroompieken van ettelijke ampères moet kunnen leveren.

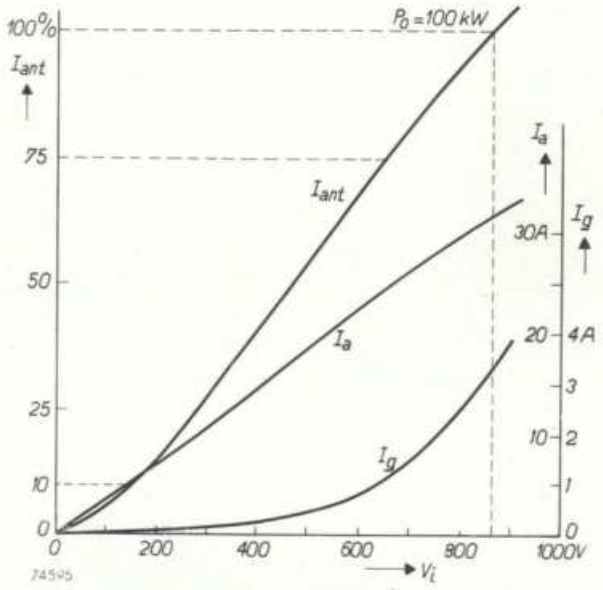


Fig. 19. Karakteristieken van de eindtrap bij modulatie in een voortrap. „Antennestroom" I_{ant}, anodegelijkstroom I_a en roostergelijkstroom I_g (I_a en I_g voor de twee buizen TBW 12/100 samen) als functie van de ingangswisselspanning V_i (grootste topspanning tussen kathode en rooster). Roostergelijkspanning $V_g = -250$ V. Voedingspanning $V_B = 6500$ V. Belastingsweerstand $R_a = 350\ \Omega$. Frequentie $f = 48{,}25$ MHz (televisiekanaal 2). $I_{ant} = 100\%$ komt overeen met de synchronisatiepieken ($P_0 = 100$ kW). $I_{ant} = 75\%$ (vgl. fig. 18) met het zwartniveau en $I_{ant} = 10\%$ met het witniveau.

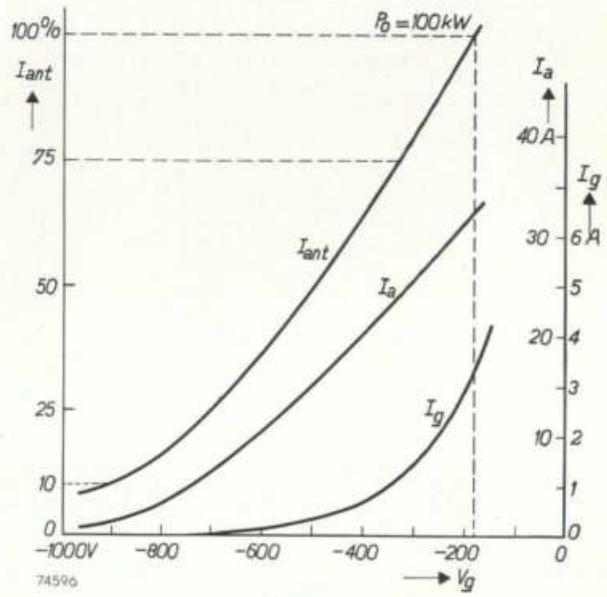


Fig. 20. Karakteristieken van de eindtrap bij modulatie in de eindtrap: I_{ant}, I_a en I_g als functie van V_g, bij $V_i = 770$ V, $V_B = 6500$ V, $R_a = 350\ \Omega$, $f = 48{,}25$ MHz. $I_{ant} = 100\%$ komt weer overeen met $P_0 = 100$ kW.

Samenvatting. Experimenteel is nagegaan of een televisiezender van zeer groot vermogen kan worden geconstrueerd waarvan de resonantiebreedte groot genoeg is voor het televisiestelsel met 625 lijnen. De schrijver had zich tot doel gesteld, met een enkelvoudige uitgangskring in de eindtrap een resonantiekromme te verkrijgen die over een gebied van 6 MHz tot op 1 dB na vlak is, bij een installatie voor een topvermogen van 100 kW.

Beschreven wordt een proefinstallatie, waarvan de frequentie regelbaar is van ca. 48 tot 68 MHz. Dit gebied omvat drie televisiekanalen van 7 MHz bandbreedte. De installatie kan continu 100 kW leveren. Dit bedrag werd beschouwd als het topvermogen, dat, bij negatieve modulatie, tijdens de synchronisatiesignalen zou optreden. Bij het daarmee corresponderende zwartniveau zijn resonantiekrommen opgenomen; deze beantwoorden aan het gestelde doel. Ook zijn modulatiekarakteristieken opgenomen, zowel voor modulatie in de eindtrap als voor modulatie in een voortrap. Deze karakteristieken zijn tussen het wit- en het zwartniveau behoorlijk lineair.

De installatie bestaat uit een eindtrap voor 100 kW met twee buizen TBW 12/100 in roosterbasisbalansschakeling, met daarvóór, van achteren naar voren: een stuurtrap voor 20 kW met zes buizen TBW 6/6000, twee sub-stuurtrappen, en een oscillator van gering vermogen en met regelbare frequentie. De eindtrap is belast op een met water gekoelde weerstand. Het in deze weerstand gedissipeerde vermogen wordt afgeleid uit de temperatuurverhoging van het koelwater.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

FOTOSYNTHESE

door R. van der VEEN.

581.132.1

Alle leven hier op aarde is uiteindelijk afhankelijk van de omzetting van zonlicht in chemische energie. Dit proces, de fotosynthese, vindt alleen plaats in groene planten, en dan nog met een gering rendement. Zou de mens er in slagen zich in dit opzicht onafhankelijk van de plantenwereld te maken, dan zouden de vooruitzichten voor de energievoorziening van onze wereld in zeer gunstige zin beïnvloed worden. Om ooit dit doel te bereiken, is in de eerste plaats een goed inzicht in het ingewikkelde fotosyntheseproces vereist; men kent echter nog slechts de grote lijnen. Een bijdrage tot onze kennis blijkt geleverd te kunnen worden door de bestudering van de fluorescentie van levende plantendelen.

Het vermogen dat de aarde van de zon als straling krijgt toegevoerd, bedraagt ca. 10^{18} kWh per jaar. De totale vermogensconsumptie in een hoog ontwikkeld land als de Verenigde Staten van Amerika bedraagt slechts ca. 10^{13} kWh per jaar, en van de gehele wereld ca. 3 maal zo veel. Verreweg het grootste deel van de door de mens gebruikte energie wordt ontleend aan de sinds onheuglijke tijden in de aardbodem opgeslagen zonne-energievoorraden, in de vorm van steenkool en petroleum. Deze voorraden zijn echter niet onuitputtelijk: aannemende dat de huidige technische ontwikkeling op dezelfde schaal voortgaat, heeft men berekend dat na enkele eeuwen de aardse energiebronnen onverbiddelijk zullen zijn opgeteerd. (Zouden wij de zonne-energie zoals die ons dagelijks wordt toegevoerd willen vervangen door de in petroleum en steenkool opgeslagen energie, dan zouden wij in minder dan drie dagen onze gehele voorraad reeds hebben verbruikt!)

Het is vanzelfsprekend, dat thans reeds pogingen worden aangewend om de gevolgen van dit interen te voorkomen. Het gebruik van atoomenergie in de vorm zoals wij die thans kunnen vrijmaken, is een kleine stap in deze richting: uranium en thorium zijn ook slechts in beperkte hoeveelheden aanwezig. Zou men er in slagen de omzetting van waterstof in helium als technisch bruikbaar proces te ontwikkelen, dan zou men inderdaad het probleem van de energie-uitputting vele honderdduizenden jaren hebben verschoven, doch zover is het nog niet.

Een voor de hand liggende mogelijkheid is, de zonne-energie direct te benutten. Een klein percentage van de aardse energieproductie geschiedt reeds op deze wijze, nl. door gebruik te maken van water- en windkracht. Een aanmerkelijke vergroting van de langs deze weg geproduceerde energie lijkt niet wel mogelijk. Nu is het bekend, dat een deel van de totale toegevoerde zonne-energie door de groene planten wordt omgezet in chemische energie. Dit proces, de fotosynthese, die de basis van alle leven is, bestaat in het vormen van koolhydraten uit het in de atmosfeer aanwezige koolzuurgas en water onder de invloed van het zonlicht. De fotosynthese bewerkt een jaarlijkse vermogensaccumulatie van 10^{15} tot 10^{16} kWh. Deze energie verdwijnt echter grotendeels weer, zonder noemenswaard door de mens ten nutte te zijn gemaakt, door ontleding van de organische stof door bacteriën, etc.

Gezien de bovenstaande cijfers, ligt het voor de hand dat de moeilijkheden van de energie-uitputting met een slag uit de wereld waren, als de mens erin zou slagen het fotosyntheseproces nuttiger te gebruiken. Een eerste stap op deze weg is het verwerven van inzicht in het zeer ingewikkelde systeem van reacties die tezamen de fotosynthese vormen.

Fotosynthese

De fotosynthese is de belangrijkste chemische reactie die op aarde voorkomt. Het levende wezen is geheel afhankelijk van de energie die in de organische stof, waaruit het is opgebouwd, als chemische energie is vastgelegd. Deze energie komt bij de ademhaling, dus door verbranding van deze organische stof, weer vrij, en houdt de processen die het leven uitmaken gaande. De eerste voorwaarde voor instandhouding van het leven is derhalve, dat langs een of andere weg steeds organische stof wordt gevormd. Deze vorming nu geschiedt in hoofdzaak slechts op één wijze, nl. onder invloed van het zonlicht op een bepaalde stof, bladgroen of chlorophyl, die in groene planten voorkomt. Hoewel er organismen zijn, die niet groen zijn en toch organische stof met behulp van licht opbouwen, blijkt bij nader onderzoek dat deze organismen toch steeds een zekere hoeveelheid bladgroen bevatten, al wordt de groene kleur in die gevallen overstemd door andere kleurstoffen.

Het is zeer merkwaardig dat de hoger ontwikkelde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wezens, zoals dier en mens, tot dusverre op geen enkele wijze (dus ook niet in het laboratorium) in staat zijn de fotosynthese te bewerkstelligen zonder daarvoor hun toevlucht te nemen tot planten. Alle hogere wezens en ook de mens zijn dus verplicht te parasiteren op de groene plant.

Het bladgroen is in de bladeren van een plant meestal aanwezig in de vorm van bladgroenkorrels of chloroplasten, die in het protoplasma van de cel rondzweven. *Fig. 1* geeft een afbeelding van enkele chloroplasten, verkregen met behulp van een electronenmicroscoop. Duidelijk is te zien, dat elke chloroplast op zijn beurt bestaat uit een aantal lensvormige lichaampjes, de grana, die ingebed liggen in een kleurloos gel, het stroma. In *fig. 2* is een fragment van een chloroplast met sterkere vergroting afgebeeld.

Het eigenlijke fotosntheseproces vindt in de chloroplasten plaats. De fotosynthese als geheel kan symbolisch worden voorgesteld door de reactie:

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{licht}} (CH_2O) + O_2 .$$

Hoewel deze formule er zeer eenvoudig uitziet, is het werkelijk gebeuren zo gecompliceerd, dat nog slechts een gedeelte ervan is ontrafeld. Het eindproduct, door (CH_2O) voorgesteld, waarvoor men moet lezen een verzameling hogere koolhydraten (suikers),

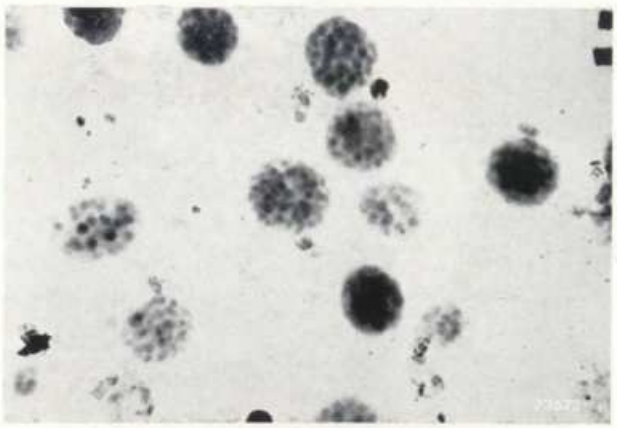


Fig. 1. Electronenmicroscoop-opname van bladgroenkorrels (chloroplasten). De afstand tussen de blokjes rechts boven bedraagt 1μ. Duidelijk is te zien dat de korrels zijn opgebouwd uit kleine lichaampjes, de grana, die zijn ingebed in het kleurloze stroma.

is de organische stof, die de energie levert voor de instandhouding van het leven. De fotosynthese behelst dus in feite de reductie van CO_2 tot koolhydraten, terwijl het ademhalingsproces correspondeert met de omgekeerde reactie, nl. de oxydatie van koolhydraten tot CO_2.

Fig. 2. Electronenmicroscoop-opname van een fragment van een bladgroenkorrel. Vier grana zijn zichtbaar, ingebed in een brok stroma. De afstand tussen de blokjes rechts onder bedraagt weer 1μ.

Mechanisme

Het is gebleken, dat de chloroplasten alléén niet in staat zijn een fotosynthese van koolhydraten uit CO_2 en water te bewerkstelligen. Wel bezitten de chloroplasten bij belichting een zeker reducerend vermogen, zoals blijkt uit de omzetting van gemakkelijk reduceerbare stoffen, bijv. ferrizouten in ferrozouten, waarbij zuurstof vrijkomt. Om kooldioxyde te reduceren, is echter een voorbehandeling van deze stof noodzakelijk. Deze voorbehandeling vindt in het protoplasma plaats, en wel onafhankelijk van het licht; men spreekt dan ook van een donkerreactie. De eigenlijke lichtreactie, gekoppeld aan enkele donkerreacties, speelt zich in de chloroplasten af.

Uit het bovenstaande blijkt alreeds, dat het fotosntheseproces als geheel oneindig veel ingewikkelder is dan door de eenvoudige reactievergelijking die boven is gegeven, wordt gesuggereerd. Om de lezer een, nog steeds zeer globale, indruk te geven hoe men zich tegenwoordig het reactiesysteem voorstelt, moge het schema van *fig. 3* dienen.

Het CO_2 uit de atmosfeer wordt in het protoplasma in vele tussenstappen, die nog merendeels onbekend zijn, omgezet tot een complex van eveneens onbekende verbindingen, dat in het schema als $(C\overset{O}{O})$ is aangegeven. Tegelijkertijd splitst het chlorophyl-eiwitcomplex van de chloroplasten, onder invloed van het licht, water in een reducerend bestanddeel, aangegeven door het symbool (H), en een oxyderend bestanddeel, aangegeven door (OH). Over wat men precies onder deze bestanddelen moet verstaan heerst nog geen overeenstemming, mogelijk heeft men hier te maken met H-atomen en OH-radicalen.

Het (H)-bestanddeel dient om het in de donkerreactie gevormde $(C\overset{O}{O})$-complex te reduceren tot koolhydraten en water. De (OH)-bestanddelen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

combineren zich waarschijnlijk tot H_2O_2-moleculen, die onder invloed van het in elke chloroplast in betrekkelijk grote concentratie aanwezige enzym catalase (een stof die men heeft kunnen isoleren) onmiddellijk in watermoleculen en zuurstof uiteenvallen. Deze zuurstof ontwijkt.

ontstaat. Daarbij wordt het gereduceerde DPN geoxydeerd, het geoxydeerde DPN wordt echter direct door de belichte chloroplast opnieuw gereduceerd. Het DPN werkt dus in zekere zin als een katalysator; door de wisselwerking van chloroplast, lichtenergie, DPN en enzymen schrijdt de reactie steeds

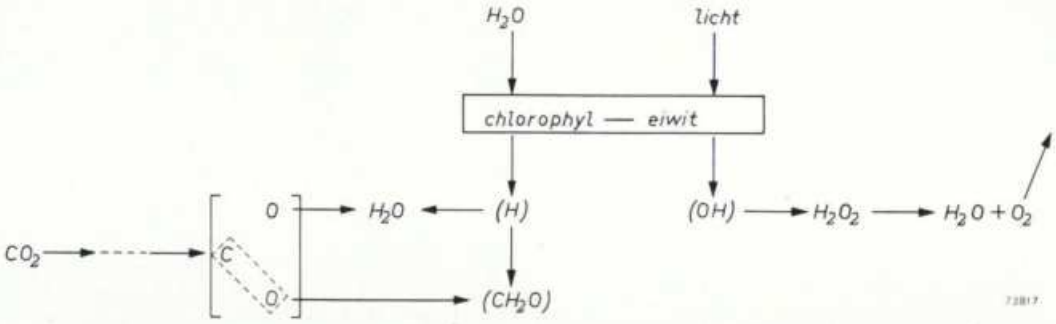


Fig. 3. Schema van het fotosyntheseproces. Links vindt men de donkerreacties, rechts de reductie door het enzym catalase van het gevormde H_2O_2 tot water en zuurstof. De eigenlijke lichtreactie in de chloroplast komt neer op de splitsing van water in een (H)-bestanddeel en een (OH)-bestanddeel. Alle zuurstof die ten slotte ontwijkt, is afkomstig uit water, niet uit het opgenomen CO_2.

Volgens dit schema is de uiteindelijk ontwijkende zuurstof dus geheel afkomstig uit het in de plant aanwezige water. Volgens de symbolische reactievergelijking in het begin van dit artikel zou men verwachten dat de vrijkomende zuurstof ten minste voor de helft van het CO_2 afkomstig zou zijn. Experimenten met het zuurstofisotoop O^{18} hebben echter deze te simplistische opvatting geheel kunnen weerleggen.

Zeer veel onderzoekingswerk is verricht om de details van de fotosynthese, die nog in het duister gehuld zijn, op te helderen. Een dieper inzicht in de diverse reacties die zich voordoen, is o.a. verkregen door het werk van Ochoa [1]) en Calvin [2]).

Eerstgenoemde toonde aan, dat het onder bepaalde omstandigheden toch mogelijk was de koolzuuromzetting direct door de chloroplasten te laten geschieden, door nl. diphosphopyridinenucleotide (DPN) bij een chloroplastensuspensie te voegen. DPN is een ingewikkelde phosphorhoudende organische stof, die overal in levende cellen aanwezig schijnt te zijn, en die gereduceerd kan worden. Bij aanwezigheid van een andere reduceerbare stof en bepaalde enzymen, wordt het gereduceerde DPN echter zeer gemakkelijk weer geoxydeerd. De conclusie van Ochoa is nu deze, dat bij aanwezigheid van gereduceerd DPN en bepaalde enzymen, CO_2 aan pyrodruivenzuur kan worden gekoppeld, waarbij dan appelzuur in dezelfde richting voort, nl. in de richting van de reductie van CO_2 tot koolhydraten.

Calvin heeft met behulp van radioactieve koolstof aangetoond, dat het CO_2 dat bij de fotosynthese wordt vastgelegd, in de eerste plaats teruggevonden wordt in de vorm van phosphoglycerinezuur. Na enige tijd waren de radioactieve C-atomen over een groot aantal andere verbindingen verspreid. Het is waarschijnlijk mogelijk, deze resultaten met die van Ochoa te verenigen, nl. in die zin dat beide berusten op de reductie van DPN door de chloroplasten. Interessant is, dat blijkbaar organische phosphaten nodig zijn om de fotosynthese tot stand te brengen, zoals trouwens reeds werd aangetoond door Wassink, Wintermans en Tjia [3]).

Men kan zich nu afvragen, „waarom" de fotosynthese op zulk een zeer ingewikkelde manier verloopt. Om deze vraag te beantwoorden, dient men zich te realiseren dat in de natuur slechts die processen een kans hebben die op een efficiente wijze het eindproduct leveren. Om met de ter beschikking staande relatief geringe energie (licht en warmte) een zo ingrijpende reactie als het synthetiseren van koolhydraten te bewerkstelligen, is de natuur aangewezen op het splitsen van de reactie in een zeer groot aantal tussenreacties, waarvan het verloop (in de ene of de andere richting) gemakkelijk beïnvloed kan worden door de omstandigheden. De aanwezigheid van

[1]) S. Ochoa, Symposia Soc. Exp. Biol. **5**, 29, 1951.
[2]) M. Calvin, J. Chem. Ed. **26**, 639, 1949.
[3]) E. C. Wassink, J. F. G. M. Wintermans en J. E. Tjia, Proc. Kon. Akad. Wet. Amst. Series C, **54**, 496-502, 1951 (No. 5).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

licht en van bepaalde enzymen nu heeft tot gevolg dat in de plantencel in het gemiddelde al deze evenwichten voor een gering bedrag in de reducerende richting worden verschoven. Hiervoor is slechts een zeer geringe energie-opneming per proces vereist. Bovendien dient men nog te overwegen, dat de gevormde tussenproducten niet slechts bij de beschouwde reacties een rol spelen doch ook elders in het organisme zeer bepaalde functies verrichten, waardoor de „efficientie" van het geheel wordt vergroot.

Lichtverzadiging

De snelheid van het fotosyntheseproces wordt bepaald door de langzaamste reactie in de keten van de lichtreactie en de donkerreacties. De lichtreactie verloopt des te sneller naarmate de lichtintensiteit groter is. Zij is, in het temperatuurgebied waar physiologische processen normaal mogelijk zijn, i.c. ongeveer van 5 °C tot 30 °C, weinig van de temperatuur afhankelijk. De donkerreacties daarentegen zijn zuiver chemische reacties, waarvan de snelheid sterk toeneemt met de temperatuur. Bij een gegeven temperatuur zal van een bepaalde lichtintensiteit af de lichtreactie sneller verlopen dan een der donkerreacties. Verdere vergroting van de lichtintensiteit zal het volledige proces dan niet meer kunnen versnellen: er treedt een lichtverzadiging op. Naarmate de temperatuur hoger is, zijn de donkerreacties sneller, en treedt de lichtverzadiging eerst bij grotere intensiteit op. In *fig 4* is dit schematisch voorgesteld.

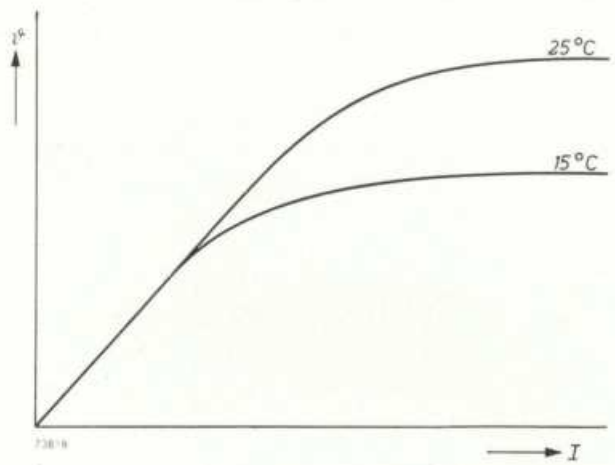


Fig. 4. Snelheid v van de fotosynthese als functie van de belichtingsintensiteit I en de temperatuur. In het stijgende gedeelte van de krommen is de lichtreactie snelheidsbepalend, in het vlakke gedeelte, waar lichtverzadiging optreedt, wordt de reactiesnelheid geheel bepaald door de donkerreacties. Deze laatste verlopen des te sneller naarmate de temperatuur hoger is. De lichtreactie is nagenoeg onafhankelijk van de temperatuur, vandaar dat de lichtverzadiging bij hogere temperatuur eerst bij een grotere intensiteit optreedt.

Onderzoek van de lichtreactie met behulp van de fluorescentie

Zoals boven is duidelijk gemaakt, is het fotosyntheseproces nog slechts in grote lijnen begrepen. Welke de omzettingen zijn die in de donkerreacties plaats vinden, is nog onbekend. Evenzo staat het met de lichtreactie. Intussen bestaat er een mogelijkheid over de lichtreactie iets meer te weten te komen.

In de lichtreactie wordt slechts een deel van de geabsorbeerde lichtenergie omgezet in chemische energie. In de natuur bedraagt het rendement slechts enkele procenten, in het laboratorium heeft men bij kleine lichtintensiteiten rendementen van meer dan 30% kunnen bereiken. De rest van de lichtenergie wordt omgezet in warmte, en voor een klein gedeelte in fluorescentiestraling. Dit nu is een gelukkige omstandigheid, want door bestudering van deze fluorescentie is men er in geslaagd het verloop van de lichtreactie enigszins te volgen. Men mag aannemen dat de verhouding van het als warmte afgegeven vermogen tot het als fluorescentie afgegeven vermogen steeds dezelfde is, wat ook de voor de chemische omzetting gebruikte fractie van het stralingsvermogen dat geabsorbeerd is moge zijn. Hieruit volgt dat de fluorescentie-intensiteit een maat is voor de hoeveelheid lichtenergie die chemisch wordt gebonden, dus voor het rendement van de fotosynthese, en wel zal de fluorescentie-intensiteit des te geringer zijn naarmate het rendement groter is.

Het zal duidelijk zijn dat meting van de fluorescentie-intensiteit ons alleen iets kan leren over het verloop van de lichtreactie. Over het verloop van de donkerreacties, en van de reacties die nog optreden na de omzetting van licht in chemische energie, kunnen we op deze manier niets te weten komen. Het is heel goed mogelijk dat een gedeelte van de chemisch gebonden lichtenergie later in het proces toch weer als warmte vrijkomt. Dit is bijv. het geval als men een blad belicht zonder dat CO_2 aanwezig is. Er is dan geen materiaal dat gereduceerd kan worden, zodat ook geen zuurstof vrijkomt. De fluorescentie is echter niet noemenswaard groter dan wanneer wel CO_2 aanwezig is. De fundamentele lichtreactie, dwz. de splitsing van water in (H)- en (OH)-bestanddelen, vindt klaarblijkelijk in dezelfde mate plaats, onverschillig of er al dan niet CO_2 voorhanden is. De splitsingsproducten vallen echter bij afwezigheid van CO_2 naderhand weer samen tot water, waarbij warmte vrijkomt en het, chemisch bezien, lijkt of er niets gebeurd is.

In het Philips Laboratorium te Eindhoven zijn uitgebreide onderzoekingen gedaan over de ver-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schijnselen in het fotosyntheseproces die zich voordoen bij het begin van de belichting, en wel door tegelijkertijd de CO_2-opneming en de fluorescentie te bestuderen [4]).

Het algemene verloop van de CO_2-opneming is in *fig. 5a* geschetst. Gedurende de eerste ogenblikken (ca. tien seconden) wordt vrij veel CO_2 opgenomen, doch daarna vermindert de opneming snel. Dan vindt, na een tijdsduur van de orde van 1 minuut, weer een geleidelijke toeneming van de fotosynthese plaats (adaptatieperiode), totdat een nagenoeg constant niveau van de koolzuuropneming bereikt is, waarvan de hoogte nog afhangt van de belichtingsintensiteit en van de plant in kwestie. De fluorescentie vertoont, afgezien van het allereerste begin, een geheel corresponderend verloop (fig. 5*b*): de

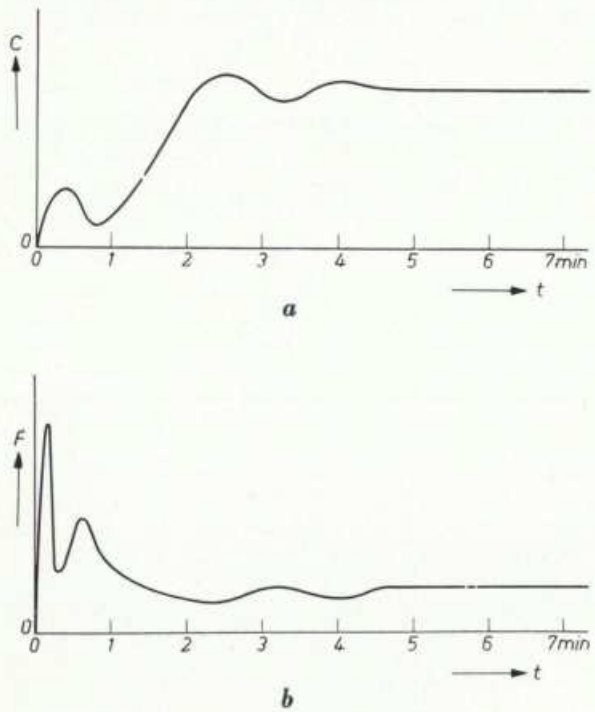


Fig. 5. *a*) Verloop van de koolzuuropneming C per tijdseenheid, *b*) van de fluorescentie-intensiteit F, als functie van de tijd t na inschakelen van de belichting. Behalve in het allereerste begin zijn de twee krommen ruwweg elkaars spiegelbeeld.

beginopneming vindt men terug als een kortstondige daling, en de adaptatieperiode als een verdere geleidelijke daling. Eventuele latere schommelingen in de fotosynthese worden geheel en al weerspiegeld in de fluorescentie-intensiteit. In het allereerste begin echter vertoont de fluorescentie een scherpe piek, waarvan het verband met de fotosynthese nog duister is.

[4]) Zie bijv. R. van der Veen, Physiologia Plantarum **4**, 486-494, 1951 (No. 3).

Onderzocht werd de invloed op de fluorescentiekromme van o.a. de temperatuur, de lichtintensiteit en de duur van de aan de belichting voorafgaande donkerperiode. Bij lage temperaturen (10 °C) verloopt het gehele proces veel langzamer en zijn

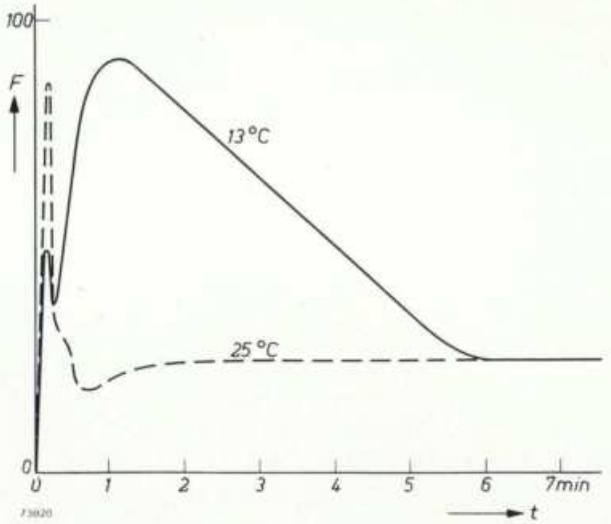


Fig. 6. Fluorescentie-intensiteit F als functie van de tijd t na inschakelen van de belichting, bij twee temperaturen: resp. 13 °C en 25 °C. Hoewel het eindniveau in beide gevallen hetzelfde is, wordt het bij de hogere temperatuur veel sneller bereikt. De metingen zijn gedaan aan een Dahliablad.

de diverse maxima hoger dan bij hogere temperaturen (25 °C), hoewel hetzelfde eindniveau van de fluorescentie wordt bereikt (*fig. 6*). Dit bevestigt dus de bewering dat de lichtreactie weinig van de temperatuur afhangt.

Verhoging van de lichtintensiteit heeft het te verwachten resultaat dat de fluorescentie-intensiteit

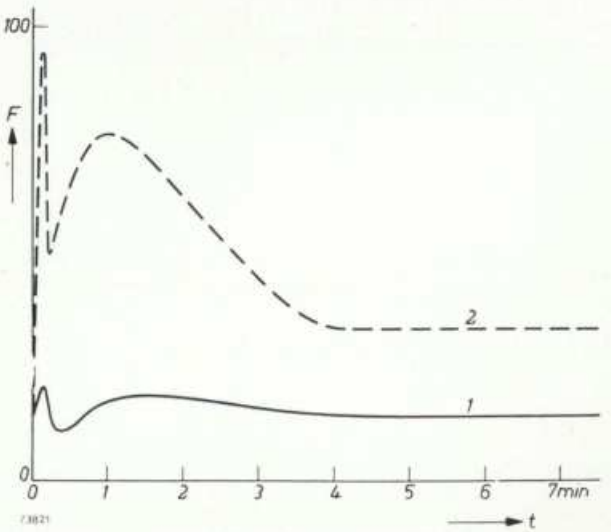


Fig. 7. Fluorescentie-intensiteit F als functie van de tijd t na inschakelen van de belichting, bij twee belichtingsintensiteiten die een factor 3 verschillen. Kromme *1* behoort bij de lage, kromme *2* bij de hoge intensiteit. Gemeten aan een tomatenblad.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toeneemt. Opvallend is echter dat het maximum in het allereerste begin sterker toeneemt dan de fluorescentie in latere perioden (*fig. 7*).

De invloed van de voorafgaande donkerperiode is in *fig. 8* geschetst. Naarmate deze periode langer was, zijn de diverse maxima alle hoger. Dit is geheel in overeenstemming met wat men al op andere, meer directe wijze had gevonden. Klaarblijkelijk herinnert de plant zich nog een vorige belichting, althans voorzover deze niet meer dan ca. 20 minuten geleden heeft plaats gehad.

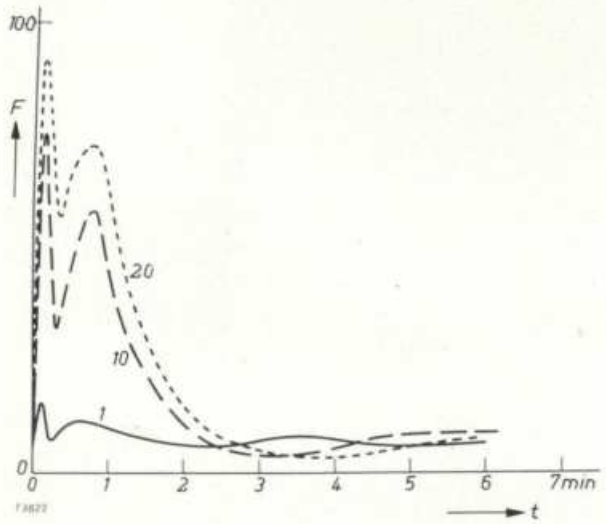


Fig. 8. De invloed van de lengte van de voorafgaande donkerperiode op de fluorescentiekromme. De bijgeschreven getallen geven de lengte van de donkerperiode in minuten. Gemeten aan een tomatenblad.

Omtrent de physische en chemische achtergrond van al deze verschijnselen heeft men zich nog geen afgerond beeld kunnen vormen. Dat de bestudering van de fluorescentie een nuttig hulpmiddel is bij het onderzoek, is echter wel gebleken.

Samenvatting. De fotosynthese, die de basis van alle leven op aarde vormt, speelt zich alleen af in groene plantendelen. De stof chlorophyl is een onmisbare tussenschakel voor de omzetting van licht in chemische energie. Het fotosyntheseproces, dat in essentie op de reductie van CO_2 tot koolhydraten onder afscheiding van zuurstof neerkomt, en als zodanig is te beschouwen als het omgekeerde van het ademhalingsproces, is zeer ingewikkeld. De eigenlijke lichtreactie vindt plaats in de bladgroenkorrels of chloroplasten van de plant, doch daaraan voorafgaande speelt zich nog een grote serie donkerreacties af, die een voorlopige omzetting van het CO_2 in een gemakkelijker reduceerbare stof bewerken, en die gedeeltelijk in het protoplasma plaats vinden. De lichtreactie kan men opvatten als de splitsing, onder invloed van het licht, van water in een reducerend en een oxyderend bestanddeel. Het eerste bewerkt de uiteindelijke reductie van CO_2 tot koolhydraten en water, het laatste doet uiteindelijk vrije zuurstof ontwijken. Gevonden is, dat in de donkerreacties de aanwezigheid van organische phosphaten van essentieel belang is. Het rendement van de fotosynthese, zoals die in de natuur verloopt, bedraagt slechts enkele procenten, in het laboratorium heeft men bij lage lichtintensiteiten rendementen van 30% en meer kunnen bereiken. Een groot gedeelte van de geabsorbeerde lichtenergie gaat als warmte, doch een klein gedeelte als fluorescentiestraling verloren. Door bestudering van de fluorescentie van groene plantendelen is men er in geslaagd vooral het beginstadium van de lichtreactie te onderzoeken. De resultaten van het fluorescentie-onderzoek duiden erop, dat de fluorescentie-intensiteit nagenoeg parallel verloopt aan het fotosyntheseproces.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN DIRECT AANWIJZENDE PRECISIEPOLAROGRAAF

door H. A. DELL *) en C. H. R. GENTRY **).

545.33:621.317.755

Reeds verscheidene jaren is het gebruikelijk om bij metallurgisch onderzoek de concentratie van bepaalde metaalionen te meten met behulp van een polarograaf. Een aan het gebruik van dit instrument verbonden bezwaar is, dat het opnemen van een polarogram en het hieruit trekken van de gewenste conclusies een tijdrovende bezigheid is. De in het volgende beschreven polarograaf komt aan dit bezwaar tegemoet doordat de resultaten direct afleesbaar zijn.

Inleiding

In de analytische scheikunde worden tegenwoordig verschillende electronische meetapparaten gebruikt. Een voorbeeld hiervan is de polarograaf, die veelvuldig toepassing vindt bij metallurgische onderzoekingen. Met dit instrument wordt de stroom gemeten die vloeit wanneer een bepaalde spanning wordt aangelegd tussen twee electrodes, die zich bevinden in de te analyseren vloeistof. Uit de vorm van de kromme die het verloop van de stroom als functie van de spanning weergeeft, het zg. polarogram, kan zowel kwalitatief als kwantitatief de aanwezigheid van bepaalde metaalionen in de oplossing worden nagegaan.

De anode kan bestaan uit een kwikplas, een calomelelectrode, of wel een andere electrode die bij de in aanmerking komende condities niet kan worden gepolariseerd. De kathode bestaat uit een kleine kwikdruppel, die onder aan een capillair buisje hangt.

Daar de te meten stromen van de orde van grootte van enkele microampères zijn, is het gebruikelijk de meting met een galvanometer uit te voeren, waardoor de installatie tamelijk kwetsbaar is. Reeds in 1939 werd in dit tijdschrift een beschrijving gegeven van een wijze waarop deze galvanometer kan worden vervangen door een kathodestraaloscillograaf of een meetbrug, waardoor behalve een robuustere opstelling ook een aanzienlijke verkorting werd verkregen van de tijd die voor de analyse van een bepaalde vloeistof nodig is [1]). Voor een kwalitatieve analyse behoeft dan niet meer een volledig polarogram te worden opgenomen en nagemeten; in plaats hiervan treedt een indicatie op de kathodestraalbuis en een aflezing op een geijkte schaal.

In hetgeen volgt zullen wij een beschrijving geven van een instrument dat eveneens is ingericht voor gebruik van een kathodestraalbuis als indicator, doch dat niet alleen een kwalitatieve, maar ook een kwantitatieve analyse mogelijk maakt. Terwijl bovendien met de meeste gebruikelijke polarografen conclusies omtrent de samenstelling van de te analyseren vloeistof eerst kunnen worden getrokken na optekening van een volledig polarogram, kan met het te beschrijven instrument het gehalte aan bepaalde metaalionen direct uit het verschil van twee aflezingen worden afgeleid, wat een grote tijdbesparing betekent. Daarbij zijn de metingen even nauwkeurig of zelfs nauwkeuriger dan op het gebied van de polarografie gewoonlijk het geval is [2]).

In *fig. 1* is een afbeelding weergegeven van de hier bedoelde polarograaf. Alvorens tot een nadere beschrijving over te gaan, zullen we enkele bijzonderheden herhalen omtrent de electrolyse met de kwikdruppelelectrode. Men zie hiervoor ook het onder [1]) aangehaalde artikel.

Electrolyse met een kwikdruppelelectrode

Wanneer tussen twee electrodes die in een oplossing van een metaalzout zijn gedompeld, een gelijkspanning wordt aangelegd die regelmatig vanaf nul aangroeit, dan ziet men in het algemeen dat door de oplossing niet onmiddellijk een merkbare electrische stroom vloeit. De oorzaak hiervan is het feit dat een metaalion voor ontlading een bepaalde electrische potentiaal nodig heeft. Deze afscheidingspotentiaal is voor ongelijksoortige ionen verschillend. Pas bij een voldoend hoge spanning kan dus een electron uit de kathode zich met een metaalion, nl. van het element dat de laagste afscheidingspotentiaal heeft, verenigen tot een metaalatoom. Is deze spanning bereikt, dan worden de uit de kathode tredende electronen aangevuld door de spanningsbron, zodat een electrische stroom gaat vloeien.

*) Mullard Research Laboratory, Salfords (Engeland).
**) Mullard Material Research Laboratory, Mitcham (Engeland).

[1]) J. Boeke en H. van Suchtelen, Snelle chemische analyse met de kwikdruppelelectrode en een oscillograaf of meetbrug als indicator, Philips techn. T. **4**, 243-249, 1939.

[2]) Een beschrijving van dit instrument werd ook reeds gegeven in een tweetal vroegere publicaties, nl.: C. H. R. Gentry en D. Newson, Metallurgia **41**, 107-111, 1949, en H. A. Dell en C. H. R. Gentry, Electronic Engineering **28**, 19-21, 1952 (No. 287).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

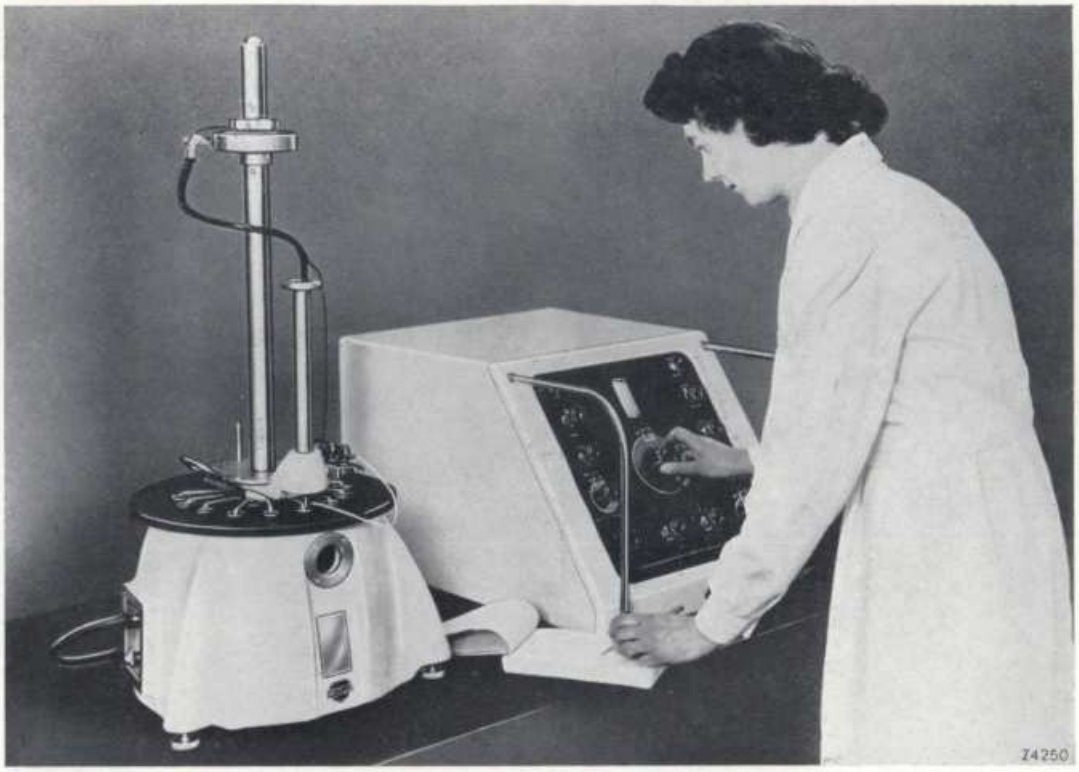


Fig. 1. De direct aanwijzende precisiepolarograaf. Links een thermostaat, waarin de electrolytische cel met de te onderzoeken oplossing en de kwikdruppelelectrode is geplaatst.

Is de oplossing niet te geconcentreerd en gebruikt men een kathode met een kleine oppervlakte, dan bereikt men bij het verder verhogen van de spanning spoedig de toestand waarbij ieder metaalion dat bij de kathode aankomt terstond wordt ontladen. De sterkte van de stroom hangt dan af van de ionenconcentratie, van de grootte van het kathodeoppervlak en van de snelheid waarmede de ionen door de oplossing diffunderen. Onder bepaalde voorwaarden, nl. wanneer men ervoor zorgt dat in de oplossing een overmaat aanwezig is van ionen waarvan de afscheidingspotentiaal hoger is dan die van de te onderzoeken soort, hangt de genoemde snelheid niet af van de aangelegde spanning. Zet men de stroom uit als functie van de spanning, dan verkrijgt men dus een grafiek (polarogram) zoals in *fig. 2* is geschetst.

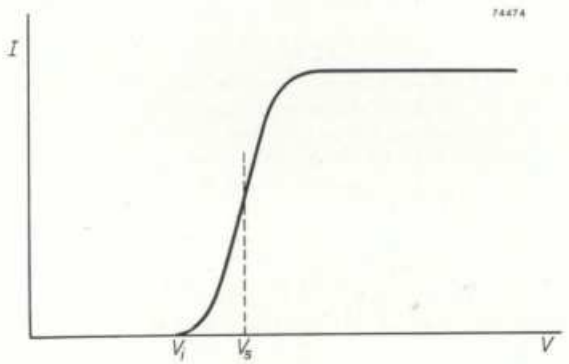


Fig. 2. Vereenvoudigde voorstelling van een gedeelte van een polarogram. (De laadstroom van de druppels is hierin niet aangegeven.) V_i spanning waarbij juist een stroom in de oplossing begint te vloeien, V_s sprongpotentiaal.

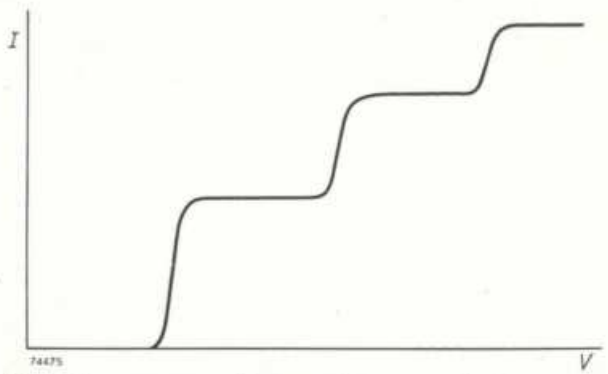


Fig. 3. Vorm van een polarogram bij aanwezigheid van verschillende soorten metaalionen in de te onderzoeken oplossing.

De gemiddelde spanning in de „stroomsprong", V_s, is karakteristiek voor de desbetreffende soort metaalionen. Zijn verschillende soorten ionen in de oplossing aanwezig, dan treden dus stroomsprongen op bij verschillende waarden van de spanning. Het polarogram verkrijgt dan de vorm van *fig. 3*. Doordat de grootte van de stroomsprongen evenredig is met de concentratie van de verschillende ionen, kan de laatstgenoemde grootheid worden bepaald door de eerstgenoemde te meten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Daar men de kathode zeer klein wil houden, bestaat het gevaar dat het oppervlak hiervan door zich afzettend metaal spoedig wordt verontreinigd. Men ontgaat deze moeilijkheid door als kathode een kleine kwikdruppel te gebruiken, die zich onder aan een capillair buisje bevindt. Door toevoer van kwik valt de druppel telkens na enkele seconden van het buisje af, waardoor het kathodeoppervlak regelmatig wordt vervangen. Door de afvallende en weer aangroeiende kwikdruppels wordt echter de meting bemoeilijkt. Daar nl. de grootte van het kathodeoppervlak steeds verandert, wijzigt zich ook de stroom gedurende de levensduur van iedere druppel, zodat bij een vaste spanning de stroom als functie van de tijd verloopt zoals in *fig. 4* is weergegeven. Wanneer de druppel zeer klein is, is de

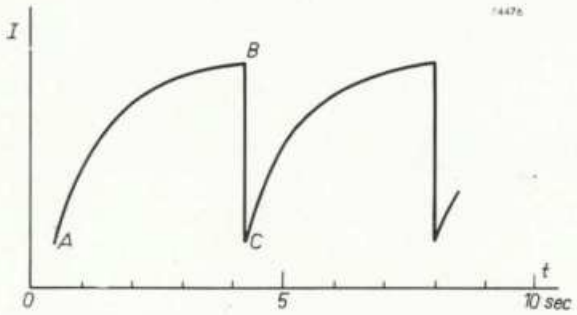


Fig. 4. Stroomverloop in de electrolytische cel als functie van de tijd bij constante spanning. Tijdens het aangroeien van een kwikdruppel neemt de stroom toe volgens de kromme AB; bij het afvallen van de druppel daalt de stroom volgens de lijn BC.

stroom gering, doch terwijl de druppel aangroeit, neemt de stroom toe volgens de kromme AB. Valt de druppel af, dan neemt de stroom plotseling af volgens de lijn BC. Men kan berekenen dat de stroom gedurende de levensduur van iedere druppel ongeveer evenredig is met de zesdemachtswortel uit de tijd.

In conventionele polarografen wordt een galvanometer gebruikt met eén zeer grote traagheid, met de bedoeling de gemiddelde waarde van de stroom te bepalen. Daar de druppels met tussenpozen van 3 tot 4 seconden vallen, is het echter niet doenlijk de slingeringen van de galvanometer volkomen te onderdrukken; hiervoor zou namelijk een zo grote traagheid nodig zijn dat de vorm van de opgenomen kromme erdoor zou worden beïnvloed. Het is daarom beter de stroom alleen te meten op één bepaald moment gedurende de levensduur van iedere druppel. Het tijdstip dat hiervoor het meest geschikt is, is het moment juist vóór het afvallen, en wel om de volgende redenen:

1) Als een druppel van de kathode afvalt, zijn de evenwichtscondities in de nabijheid van de kathode sterk verstoord; hierdoor is het zeer moeilijk de juiste betekenis te bepalen van de stroom in het begin van de levensduur van de druppels.
2) De stroom varieert het langzaamst aan het eind van de levensduur van de druppels, waardoor het meten van de stroom op dit moment met de minste moeilijkheden gepaard gaat.

In het instrument dat hier zal worden beschreven, wordt dan ook de stroom gemeten telkens op de momenten juist vóór het afvallen van de druppels.

Gebruik van een oscillograaf voor polarografische metingen

Het is gewenst de schakeling zodanig uit te voeren dat de oscillograaf, die wij als indicatiemiddel willen toepassen, wordt gebruikt als nulspanningsindicator, waardoor deze niet behoeft te worden geijkt. Een hiertoe bruikbare schakeling is in *fig. 5* voorgesteld. Door middel van de regelweerstand R_2 kan op de potentiometer R_1 een vaste spanning V_0 worden ingesteld, waardoor de spanning V_1 op een ijkschaal langs R_1 kan worden afgelezen. Hiertoe dient R_1 zo klein te zijn dat de invloed van de stroom in de electrolytische cel Z op de spanningsverdeling langs R_1 is te verwaarlozen. In serie met Z is een weerstand R_3 geschakeld. De spanning op deze weerstand is dus een maat voor de in de cel vloeiende stroom. De weerstand R_3 is verbonden met het sleepcontact van een spanningsdeler R_5, die in serie met de weerstanden R_4 en R_6 op dezelfde spanning is aangesloten als R_1. De waarde van R_3 moet groot zijn ten opzichte van R_5 en R_6, zodat de invloed van de

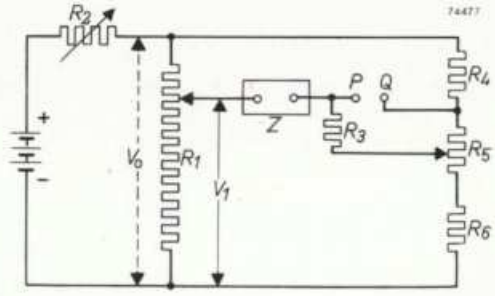


Fig. 5. Schakeling waarmee de stroom in de electrolytische cel Z door middel van een nulspanningsmethode kan worden gemeten. Indien tussen P en Q geen spanning aanwezig is, kan de stroom in Z op een ijkschaal aan R_5 worden afgelezen.

stroom in R_3 op de spanningsverdeling langs R_5 kan worden verwaarloosd. Wordt nu tussen de punten P en Q een spanningsmeter aangesloten en het glijcontact van R_5 zodanig ingesteld dat tussen deze punten geen spanning wordt gemeten, dan is de spanning over Z gelijk aan V_1 verminderd met een bepaald vast bedrag, nl. de spanning op $R_5 + R_6$. Tijdens het aangroeien van een druppel wijzigt zich

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de stroom in Z en R_3, dus verandert ook de spanning tussen P en Q. Op het moment dat tussen deze punten geen spanning aanwezig is, is de stroom in Z en R_3 gelijk aan de spanning op het bovenste gedeelte van R_5 gedeeld door R_3. Men kan derhalve op R_5 een geijkte stroomschaal aanbrengen, die geldt als tussen P en Q geen spanning aanwezig is. Op deze wijze wordt dus de stroom in Z inderdaad met een nulspanningsmethode gemeten.

Ten einde hierbij als spanningsindicator een kathodestraalbuis te kunnen gebruiken, werd ieder van de punten P en Q via een uit twee trappen bestaande versterker verbonden met één der verticaal afbuigende platen. In de verbinding van P naar één dezer versterkers is een weerstand R_7 opgenomen (*fig. 6*), terwijl door een snel werkend

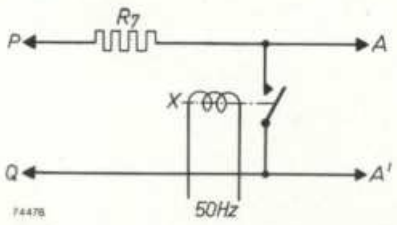


Fig. 6. Schakeling die het mogelijk maakt om met behulp van een kathodestraalbuis te constateren of tussen de punten P en Q (fig. 5) al of niet een spanningsverschil aanwezig is. De punten A en A' zijn ieder via een versterker verbonden met één der verticaal afbuigende platen van de kathodestraalbuis. Door middel van een snel werkend relais X worden deze punten 100 maal per seconde met elkaar verbonden en weer gescheiden.

relais X, dat op een wisselspanning van 50 Hz is aangesloten, de ingangsklemmen van de beide versterkers 100 maal per seconde met elkaar verbonden en weer gescheiden worden. Wanneer nu op de horizontaal afbuigende platen een zaagtandspanning wordt aangesloten, verschijnt op het scherm een figuur zoals is voorgesteld in *fig. 7a*. De rechte lijn p komt overeen met een spanning nul en de kromme q is de grafiek van de spanning tussen P en Q als functie van de tijd. De figuur komt tot stand doordat de lichtvlek beurtelings een stukje van p en q beschrijft (fig. 7*b*).

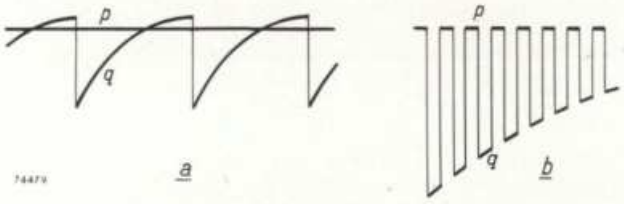


Fig. 7. *a*) Beeld dat op het scherm van de kathodestraalbuis verschijnt bij toepassing van de schakeling volgens fig. 5 en 6. De lijn p komt overeen met een spanning nul, terwijl de kromme q het verloop weergeeft van de spanning tussen P en Q als functie van de tijd.
b) Vergrote voorstelling van een gedeelte van (*a*). De lichtstip beschrijft beurtelings een gedeelte van de lijnen p en q.

Bij een meting wordt de spanningsdeler R_5 zodanig ingesteld dat de bovenste punten van de kromme q op de lijn p vallen. In dit geval is de spanning tussen P en Q juist nul op de momenten vóór het afvallen van de kwikdruppel, zodat de stroom die op deze momenten in de cel Z vloeit, op R_5 kan worden afgelezen. De instelling wordt bemoeilijkt door het feit, dat het tijdsinterval waarmede de kwikdruppels vallen, vrij groot is, nl. 1 tot 4 sec. Op twee manieren kan de instelling worden vergemakkelijkt. Ten eerste kan men het gebruik van een tijdbasis achterwege laten, waardoor op het scherm twee punten verschijnen, het ene stilstaand, en het andere op en neer bewegend. De spanningsdeler R_5 wordt dan zodanig ingesteld dat het ene punt het andere juist bereikt. (Deze methode wordt toegepast bij het in fig. 1 afgebeelde apparaat.) Volgens een andere methode kan de tijdbasis worden gesynchroniseerd met de afvallende druppels, zodat op het scherm een stilstaand beeld, het liefst bestaande uit slechts één periode van de stroomkromme, wordt getekend (*fig. 8*). Voor deze synchronisatie kan men gebruik maken van het feit dat telkens bij het afvallen van een druppel op de weerstand R_3 een spanningstoot van ongeveer $\frac{1}{4}$ V ontstaat.

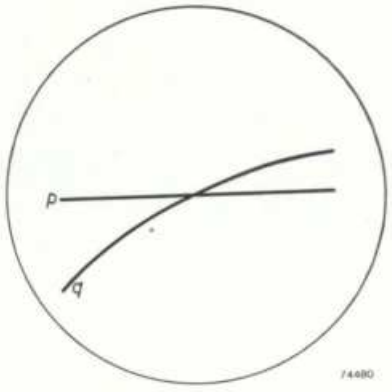


Fig. 8. Door synchronisatie van de tijdbasis met de aangroeiende en afvallende druppels kan er voor worden gezorgd, dat op het scherm van de kathodestraalbuis slechts één periode van de kromme q wordt beschreven.

Het blijkt nu in de practijk vrij gemakkelijk te zijn de rechterzijde van de gebogen lijn q te laten samenvallen met de rechte p, speciaal wanneer een buis met een lang nalichtend scherm wordt gebruikt.

Het punt of de lijn waarmede de spanning nul wordt aangegeven, moet zeer stabiel zijn, om een nauwkeurige instelling mogelijk te maken. Om de lijn p (fig. 7 en 8) werkelijk als een rechte lijn af te beelden, resp. het nulpunt te doen stilstaan, is het nodig in de versterkers koppelelementen met een zeer grote tijdconstante te gebruiken. Hierdoor ontstaan dikwijls moeilijkheden ten gevolge van de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lange hersteltijd na een toevallige overbelasting. Om deze bezwaren te ontgaan, zijn in de hier beschreven polarograaf gelijkspanningsversterkers toegepast.

Compensatie van de druppellaadstroom

Voor een kwantitatieve meting moet, zoals reeds eerder werd vermeld, niet alleen de spanning worden gemeten waarbij stroomsprongen optreden, doch dient ook de grootte van de stroomsprongen te worden bepaald. Indien een polarogram de vorm van fig. 2 en 3 had, zou dit laatste zeer eenvoudig zijn. Immers, men behoefde dan slechts de stroom te meten bij twee spanningen, waarvan de één wat groter en de ander wat kleiner is dan de sprongpotentiaal.

In werkelijkheid wijkt echter de vorm van een polarogram af van de in deze figuren geschetste vormen, in dier voege dat de gedeelten die in fig. 2 en 3 horizontaal zijn getekend, een zekere helling vertonen. Hierdoor krijgt een polarogram in de nabijheid van een stroomsprong een vorm zoals in *fig. 9* is voorgesteld. De oorzaak hiervan is het feit dat iedere nieuw gevormde druppel geladen wordt, waarbij de laadstroom ongeveer evenredig is met de aangelegde spanning. Indien men nu de stroom meet ter weerszijden van de stroomsprong, dus bijv. bij de spanningen V' en V'', dan zou men als grootte van de stroomsprong vinden de in fig. 9 met I_1 aangegeven waarde. In werkelijkheid is de grootte van de stroomsprong die een maat is voor de concentratie van het desbetreffende metaalion, gelijk aan I_2. Men kan natuurlijk de grootte hiervan bepalen door eerst een volledig polarogram op te nemen en hierin de raaklijnen AB en CD te tekenen. Deze methode, die inderdaad de meest gebruikelijke

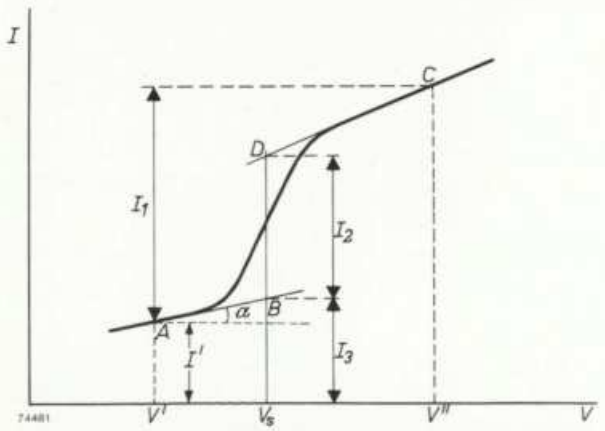


Fig. 9. Ten gevolge van de laadstroom van de druppels vertonen de rechte gedeelten van een polarogram een zekere helling. Met de in dit artikel beschreven polarograaf kan de stroomsprong I_2 uit het verschil van twee aflezingen I_3 en $I_2 + I_3$ worden bepaald.

is, is uiteraard tamelijk tijdrovend. Om deze reden is de hier beschreven polarograaf zodanig ingericht dat de genoemde grafische constructie electrisch kan worden nagebootst. Op deze wijze wordt dus een „direct aanwijzend" instrument verkregen.

Het hiertoe dienende schema is weergegeven in *fig. 10*. In serie met de spanningsdeler R_1 zijn twee regelbare weerstanden R_7 en R_8 aangebracht, waarvan de beweegbare contacten zodanig met elkaar

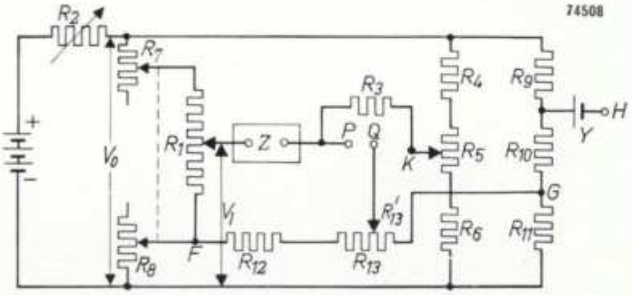


Fig. 10. Principeschema van de polarograaf waarbij de druppellaadstroom kan worden gecompenseerd. Z electrolytische cel, Y standaardelement, met behulp waarvan de spanning V_0 nauwkeurig op een bepaalde vaste waarde wordt ingesteld.

zijn gekoppeld dat bij variatie van R_7-R_8 de totale weerstand $R_7 + R_1 + R_8$ constant blijft. Bovendien is nog een spanningsdeler, bestaande uit de weerstanden R_9, R_{10} en R_{11}, aangebracht. De grootte van de weerstanden is zodanig gekozen dat indien R_7 gelijk is aan R_8, de spanning in het punt F gelijk is aan die in het punt G. Tussen deze punten is wederom een spanningsdeler aangesloten, bestaande uit de weerstand R_{12} en de potentiometer R_{13}. Deze weerstanden zijn zo groot dat hun invloed op de spanningsverdeling over R_9, R_{10} en R_{11} en over R_7, R_1 en R_8 kan worden verwaarloosd. Het punt dat in fig. 5 met Q werd aangegeven, is aangesloten op het glijcontact van R_{13}.

Wanneer dit contact geheel naar rechts is geplaatst, ondergaat de spanning van Q geen verandering indien V_1 met behulp van R_7-R_8 wordt gevarieerd. Bij deze stand van R_{13} is R_5 geijkt, dwz. als R_5 nu zo ingesteld wordt dat de spanning tussen P en Q nul is, komt de hierbij op R_5 afgelezen stroom overeen met de stroom in de electrolytische cel Z. Is $R_7 = R_8$, is dus tussen de punten F en G geen spanning aanwezig, dan heeft het naar links bewegen van het glijcontact van R_{13} geen invloed op deze situatie, immers de spanning van het punt Q verandert hierdoor niet. Is echter $R_7 \neq R_8$, dus de spanning in F niet gelijk aan die in G, dan zal de stand van R_5 waarbij de spanning tussen P en Q juist vóór het afvallen van de druppels nul is, afhankelijk zijn van de stand van R_{13}.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De gang van zaken bij het uitvoeren van een meting is nu als volgt. Nadat met behulp van R_1 (terwijl $R_7=R_8$) de spanning V_1 zodanig is ingesteld dat de spanning op de cel Z gelijk is aan de sprongpotentiaal V_s van het element waarvan men de aanwezige hoeveelheid wenst te kennen, wordt door middel van R_7-R_8 een verandering van V_1 aangebracht, zodat de spanning op Z bijv. gelijk wordt aan V'. R_5 en R_{13} worden zodanig ingesteld dat op de momenten juist voor het afvallen van de druppels geen spanning tussen P en Q aanwezig is, en wel kiest men de standen van deze spanningsdelers zodanig dat bij een kleine variatie van R_7-R_8 de spanning tussen P en Q nul blijft. Na enig proberen is men hierin spoedig geslaagd. In dit geval zijn dus de variaties van de spanningen op de punten P en Q bij kleine wijzigingen van R_7-R_8 even groot. De stroom die nu op de geijkte schaal van R_5 kan worden afgelezen, is niet gelijk aan de werkelijke stroom (immers de ijking had plaats bij geheel naar rechts geschoven glijcontact van R_{13}). Men kan aantonen (zie Aanhangsel) dat bij deze standen van R_5 en R_{13} op R_5 de in fig. 9 met I_3 aangegeven waarde wordt afgelezen.

Wordt vervolgens met behulp van R_7-R_8 de spanning op de cel Z ingesteld op een waarde die aan de andere zijde van V_s ligt, bijv. V'', dan kan men op analoge wijze $I_2 + I_3$ meten. Het verschil van deze aflezingen geeft ons dus de gevraagde stroomsprong I_2.

Het complete apparaat

In het apparaat zoals het ten slotte is uitgevoerd, is de weerstand R_3 in vijf stappen omschakelbaar. Hierdoor kunnen stromen tot 100 μA met een nauwkeurigheid van 0,1 μA worden gemeten, terwijl verschillen van 0,01 μA nog zichtbaar zijn. De weerstanden zijn zodanig gekozen dat de aan de electrolytische cel gelegde spanning kan worden gevarieerd tussen 3,0 V in één richting tot 0,3 V in de andere richting, wat voor vrijwel alle te meten ionenconcentraties voldoende is.

Voor het nauwkeurig instellen van de spanning V_0 op de waarde waarbij R_1 en R_5 zijn geijkt, wordt de spanning op de weerstand R_{10} vergeleken met die van een standaardelement Y. Dit kan op eenvoudige wijze geschieden met de toch aanwezige oscillograaf. De beide versterkers die bij een meting de punten P en Q met de afbuigplaten van de kathodestraalbuis verbinden, kunnen hiertoe met behulp van een omschakelaar worden aangesloten op de punten die in fig. 10 met H en G zijn aangegeven.

Het bleek van veel belang te zijn dat de temperatuur van de te onderzoeken oplossing nauwkeurig constant is. De electrolytische cel wordt daarom geplaatst in een thermostaat waarmede de temperatuur binnen 0,05 °C constant wordt gehouden. Mede hierdoor kan met deze polarograaf de concentratie van bepaalde metaalionen met een nauwkeurigheid van 0,3% worden bepaald, wat gunstig afsteekt vergeleken met de nauwkeurigheid van ongeveer 1% die met conventionele polarografen wordt verkregen.

Aanhangsel: Berekening betreffende de compensatie van de laadstroom van de druppels

Wij zullen de spanning tussen de onderste lijn in fig. 10 en de punten F, P, Q, K, en G aanduiden als V_F, V_P, enz.

De ijking van de op R_5 aangebrachte schaal heeft plaats bij $V_Q = V_P = V_F = V_G$, zodat bij iedere stand van het glijcontact van R_5 het verband tussen V_K en de op de ijkschaal aangegeven waarde I_{ij} van de celstroom is:

$$V_K + I_{ij}R_3 = V_G. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

De hieruit volgende waarde van I_{ij} is dus alleen dàn gelijk aan de werkelijke waarde I van de stroom als $V_Q = V_G$. Is $V_F \neq V_G$ en het glijcontact van R_{13} niet geheel naar rechts geplaatst, dan is dit laatste niet het geval.

Bij het uitvoeren van een meting wordt allereerst V_1 zodanig ingesteld dat, terwijl $V_Q = V_P = V_F = V_G$, de spanning V op de cel gelijk is aan de sprongpotentiaal V_s. Uit fig. 10 lezen we af dat in dit geval geldt:

$$V_1 - V_F = V_s. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Onder handhaving van (2) wordt nu een wijziging in V_F aangebracht. De celstroom en celspanning noemen we dan I' resp. V' (zie fig. 9), terwijl de helling van de raaklijn in het desbetreffende punt (A) aan het polarogram als α wordt aangeduid.

Vervolgens worden de glijcontacten van R_5 en R_{13} zodanig ingesteld dat voldaan is aan de volgende betrekkingen:

$$V_P = V_Q, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_P}{\partial V_F} = \frac{\partial V_Q}{\partial V_F} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Wij zullen nu aantonen dat op deze wijze een instelling van R_5 is bereikt waarbij V_K een zodanige waarde heeft dat de uit (1) volgende waarde van I_{ij} gelijk is aan de in fig. 9 met I_3 aangegeven stroom.

Beschouwen wij eerst de tak R_{12}-R_{13}, dan kunnen wij voor V_Q schrijven:

$$V_Q = V_G + (V_F - V_G)\frac{R'_{13}}{R_{12} + R_{13}}, \quad \ldots \quad (5)$$

dus

$$\frac{\partial V_Q}{\partial V_F} = \frac{R'_{13}}{R_{12} + R_{13}}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Voor V_P kunnen wij volgens fig. 10 schrijven:

$$V_P = V_K + I'R_3 = V_1 - V'. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Daar een variatie van V_F een even grote verandering van V_1 veroorzaakt, is $\partial V_P/\partial V_F$ gelijk aan $\partial V_P/\partial V_1$. Beschouwen wij nu de tak Z-R_3 en overwegen wij dat de cel Z voor spanningsvariaties een weerstand $\operatorname{cotg}\alpha$ vertegenwoordigt, dan geldt volgens fig. 10:

$$\frac{\partial V_P}{\partial V_F} = \frac{R_3}{R_3 + \operatorname{cotg}\alpha}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om te voldoen aan (3), moeten volgens (5) en (7) V_K en R_{13}' zodanig worden ingesteld dat voldaan is aan:

$$V_K = V_G + (V_F - V_G)\frac{R'_{13}}{R_{12} + R_{13}} - I'R_3. \quad . \quad . \quad (9)$$

Om tevens te voldoen aan (4), moet volgens (6) en (8) R_{13}' gelijk zijn aan de waarde die volgt uit:

$$\frac{R'_{13}}{R_{12} + R_{13}} = \frac{R_3}{R_3 + \operatorname{cotg}\alpha}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

(V_K speelt hierbij geen rol).

Voor de bij V_K behorende waarde van I_{ij} vinden we nu uit (1), (9) en (10):

$$I_{ij} = I' + (V_G - V_F)\frac{1}{R_3 + \operatorname{cotg}\alpha}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Daar uit (3), (5), (7) en (10) volgt:

$$V_s - V' = (V_G - V_F)\frac{\operatorname{cotg}\alpha}{R_3 + \operatorname{cotg}\alpha},$$

kan voor (11) worden geschreven:

$$I_{ij} = I' + (V_s - V')\operatorname{tg}\alpha = I_3,$$

waarmee het beweerde is aangetoond.

Samenvatting. In dit artikel wordt een beschrijving gegeven van een polarograaf die direct aanwijzend is, waarmede wordt bedoeld dat het voor kwantitatieve analyses niet noodzakelijk is een volledig polarogram op te nemen. De concentratie van een gegeven metaalion in de te onderzoeken oplossing kan direct uit het verschil van twee aflezingen op het instrument worden afgeleid. Als kathode wordt gebruik gemaakt van een kwikdruppel die telkens na 1 tot 4 sec wordt vernieuwd. De in de oplossing vloeiende stroom wordt gemeten op de momenten juist vóór het afvallen van de kwikdruppels, waarbij als indicatie-instrument een kathodestraalbuis is toegepast. De mogelijkheid om de grootte van de stroomsprongen direct op het instrument af te lezen wordt verkregen door het toepassen van een schakeling waarmede de grafische constructie in het polarogram electrisch wordt nagebootst.

DRIE METHODES VOOR HET METEN VAN MAGNETOSTATISCHE VELDEN

I. METING VOLGENS HET GENERATORPRINCIPE

door B. F. JÜRGENS.

II. METING VAN HET VELD LANGS DE AS VAN MAGNETISCHE ELECTRONENLENZEN

door A. C. van DORSTEN en A. J. J. FRANKEN.

III. METING MET BEHULP VAN PROTONRESONANTIE

door H. G. BELJERS.

621.317.42:538.082

Bij veel onderzoekingen is het nodig de sterkte van magnetostatische velden te meten. De manier waarop dit het beste kan gebeuren hangt af van de eigenschappen van die velden. In dit artikel worden drie van de methodes beschreven die in de Philipslaboratoria tegenwoordig in gebruik zijn en die elk hun eigen toepassingsgebied hebben. De eerste methode is bruikbaar bij de meeste magnetische circuits en heeft een nauwkeurigheid van enige procenten. De tweede is speciaal ontwikkeld voor metingen aan magnetische electronenlenzen. De derde methode maakt een zeer nauwkeurige absolute meting van vrij sterke homogene velden mogelijk.

Inleiding

Het aantal methodes dat ontwikkeld is om de sterkte van magnetostatische velden te meten is zeer groot en de literatuur over dit onderwerp groeit nog steeds *). Vele onderzoekers die bij het uitvoeren van hun experimenten magneetvelden moeten meten, ontwikkelen een apparatuur die speciaal voor hun doel geschikt is.

De aanleiding tot het ontwikkelen van speciale apparatuur is veelal dat het veld beperkt is tot een kleine ruimte of dat men dicht bij wanden wil meten. Voorbeelden hiervan zijn de velden in de luchtspleten van electrische machines of van draaispoelinstrumenten. Ook de wijze waarop de meetplaatsen toegankelijk zijn voor het meetlichaam, is van invloed op de uitvoering van de apparatuur. Zo is de luchtspleet van een ijzercircuit gewoonlijk slechts toegankelijk in een richting loodrecht op de krachtlijnen. De boring

*) Een overzicht van gebruikelijke methodes geeft bijv. L. W. Mc Keehan, The measurement of magnetic quantities, J. Opt. Soc. Amer. and Rev. sci. Instrum. **19**, 213-242, 1929.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van een magnetische electronenlens daarentegen is juist toegankelijk in een richting evenwijdig aan de krachtlijnen.

Ook het meten van sterk inhomogene velden heeft zijn problemen. Men meet steeds een zekere gemiddelde waarde van de magnetische inductie over de ruimte die door het meetlichaam wordt ingenomen. Daardoor ontstaat onzekerheid over de plaats waar de gemeten inductie nu eigenlijk heerst. Men lost deze moeilijkheid dikwijls zo goed mogelijk op door de afmetingen van het meetlichaam zeer klein te maken. Bij de eerste meetmethode die in dit artikel wordt beschreven, is deze oplossing gekozen. Het is echter soms ook mogelijk exact een locale waarde van het veld te bepalen met een meetlichaam dat niet klein is, namelijk door gebruik te maken van bijzondere eigenschappen van het magnetische veld. De tweede hier te bespreken methode is hiervan een voorbeeld **).

De ontdekking en bestudering van nieuwe verschijnselen die door een magneetveld worden beinvloed, heeft al herhaaldelijk aanleiding gegeven tot het ontwikkelen van nieuwe meetapparatuur. Dit is ook het geval geweest bij de derde in dit artikel beschreven methode. Deze is een neveneresultaat van het onderzoek van de magnetische momenten van de atoomkernen. Een kenmerk van deze meetmethode is de buitengewoon grote nauwkeurigheid (tot op $^1/_{10}$ promille).

) Een ander voorbeeld is te vinden bij: W. F. Brown en J. H. Sweer, The fluxball. A test coil for point measurements of inhomogeneous magnetic fields, Rev. sci. Instrum. **16, 276-279, 1945.

I. METING VOLGENS HET GENERATORPRINCIPE

Dikwijls worden magnetische inducties gemeten volgens het generatorprincipe [1]). Een spoeltje wordt in het te meten veld rondgedraaid om een as die loodrecht staat op de hartlijn van het spoeltje. De opgewekte wisselspanning is evenredig met het toerental en met de component van de inductie loodrecht op de draaiingsas. Is het toerental constant, dan is deze wisselspanning een maat voor de genoemde component van de inductie. Gewoonlijk gebruikt men een synchrone motor voor de aandrijving van het spoeltje. Het toerental is dan constant voor zover de netfrequentie constant is.

In de hier te beschrijven apparatuur is op de as van het synchrone motortje een verlengstuk van een gemakkelijk bewerkbare kunststof („Perspex") bevestigd. Nabij het einde van deze „Perspex"-as is een spoeltje van zeer geringe afmetingen aangebracht (*fig. 1*). De wisselspanning die wordt opgewekt als het spoeltje in een magneetveld roteert, wordt via bronzen sleepringen en zilveren sleepveren (*fig. 2*) door een afgeschermde kabel toegevoerd aan een versterker. Het signaal wordt, na versterking, gelijkgericht en met een draaispoelinstrument gemeten. De uitslag van deze meter is een directe maat voor de veldcomponent loodrecht op de motoras ter plaatse van het spoeltje. Men ziet de apparatuur in werking in *fig. 3*.

Het gebruikte meetspoeltje is belangrijk kleiner dan men bij vroegere toepassingen van deze methode heeft kunnen realiseren. Binnen- en buitendiameter

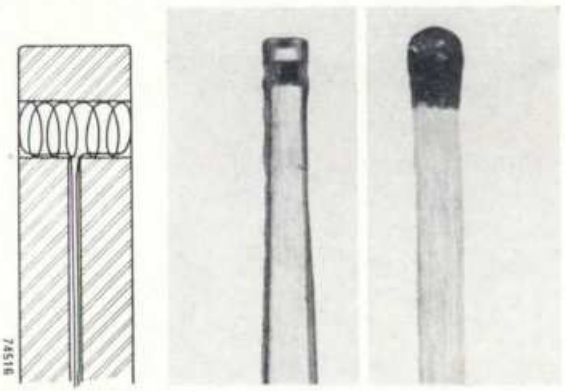


Fig. 1. Bij de meting volgens het generatorprincipe wordt een spoeltje met een constante snelheid in het te meten veld rondgedraaid. Het spoeltje is aangebracht in het uiteinde van een „Perspex"-as, die als verlengstuk op de as van een synchroon motortje is bevestigd. Links: vergrote schets, midden: foto van het uiteinde van de „Perspex"-as met het spoeltje. Rechts ter vergelijking een luciferkop, op dezelfde schaal.

zijn respectievelijk 0,5 en 1 mm, terwijl de lengte 1,5 mm bedraagt. Dank zij deze geringe afmetingen kan men in inhomogene velden locale waarden van het veld goed bepalen.

Bij zo 'n klein spoeltje zal de per winding omvatte flux ook zeer klein zijn. Bovendien kan het aantal

[1]) A. Kohaut, Ein Messgerät für magnetische Felder, Z. techn. Phys. **18**, 198-199, 1937.
R. H. Cole, A magnetic field meter, Rev. sci. Instrum. **9**, 215-217, 1938.
O. Klemperer en H. Miller, Search-coil oscillator for measuring fields of magnetic electron lenses, J. sci. Instrum. **16**, 121-123, 1939.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

windingen niet zeer groot zijn, doordat de draaddikte niet willekeurig klein kan worden gemaakt. Met de afmetingen van het spoeltje neemt dus de gevoeligheid snel af. Door de toegepaste versterking is deze echter toch zo groot dat in de gevoeligste stand een veld van $3 \cdot 10^{-4}$ Wb/m^2 (3 gauss) de wijzer van het aanwijsinstrument zijn volle uitslag geeft.

Het spoeltje is gewikkeld van geëmailleerd koperdraad van 25 micron diameter. Daardoor kon het aantal windingen nog 500 bedragen. Ter wille van de gevoeligheid werd voor het toerental een vrij hoge waarde gekozen, nl. 50 omwentelingen per seconde (3000 per min). Tot veel hogere waarden kan men niet goed gaan, aangezien het „Perspex" verlengstuk van de motoras niet extra gelegerd is.

Houdt men de „Perspex"-as zo, dat de hartlijn hiervan ter plaatse van het spoeltje aan de krachtlijnen raakt, dan is de veldcomponent loodrecht op deze as nul. De meter slaat dan niet uit. Zo kan men dus de richting van de krachtlijnen bepalen. Door de stand zo te kiezen dat de uitslag maximaal wordt, kan men de absolute waarde van de inductie meten. Voorwaarde voor het uitvoeren van deze metingen is natuurlijk dat men voldoende ruimte heeft om deze standen mogelijk te maken.

Om de gunstigste energieoverdracht van het meetspoeltje aan de versterker te krijgen, moest de impedantie van dit spoeltje worden aangepast bij de ingangsimpedantie van de versterker. Deze ingangsimpedantie bestaat vrijwel alleen uit de weerstand van een verzwakker, die gebruikt wordt om het meetgebied te variëren, en bedraagt 500 000 ohm (zie *fig. 4*). Bij de frequentie van 50 Hz speelt de zelfinductie van het meetspoeltje nog geen rol en wordt zijn impedantie bepaald door de gelijkstroomweerstand, die 70 ohm bedraagt. Het was dus wenselijk het spoeltje via een ingangstransformator aan de versterker te koppelen. Nu zal de verhouding van de spanning over de primaire wikkeling van de transformator tot de spanning die in het meetspoeltje wordt geïnduceerd, toenemen met de frequentie. Immers, de beschikbare spanning wordt verdeeld over de

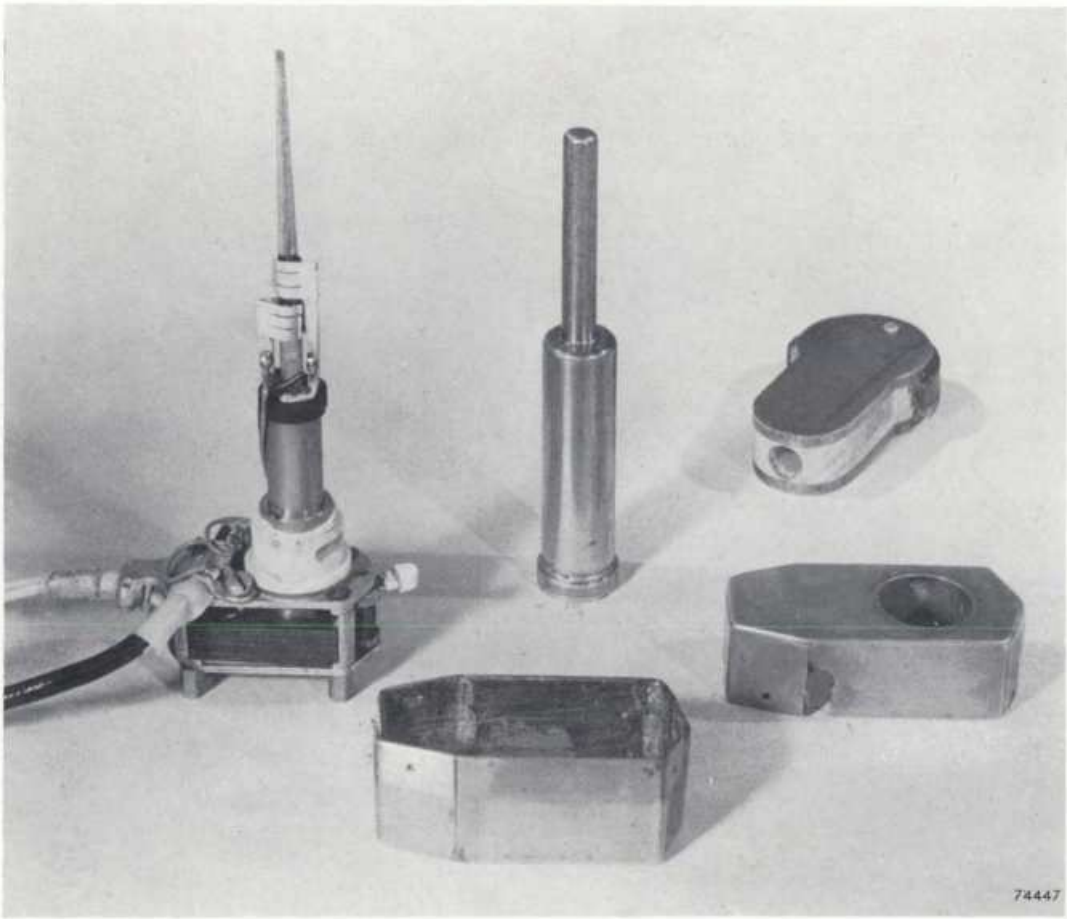


Fig. 2. De synchrone motor met de „Perspex"-verlenging van de as. De zilveren sleepveren voor het afnemen van de spanning zijn duidelijk zichtbaar. Behalve de beschermkappen van de motor en de beschermbus van de as, ziet men achteraan nog een magneet liggen, die voor de ijking van het apparaat dient.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

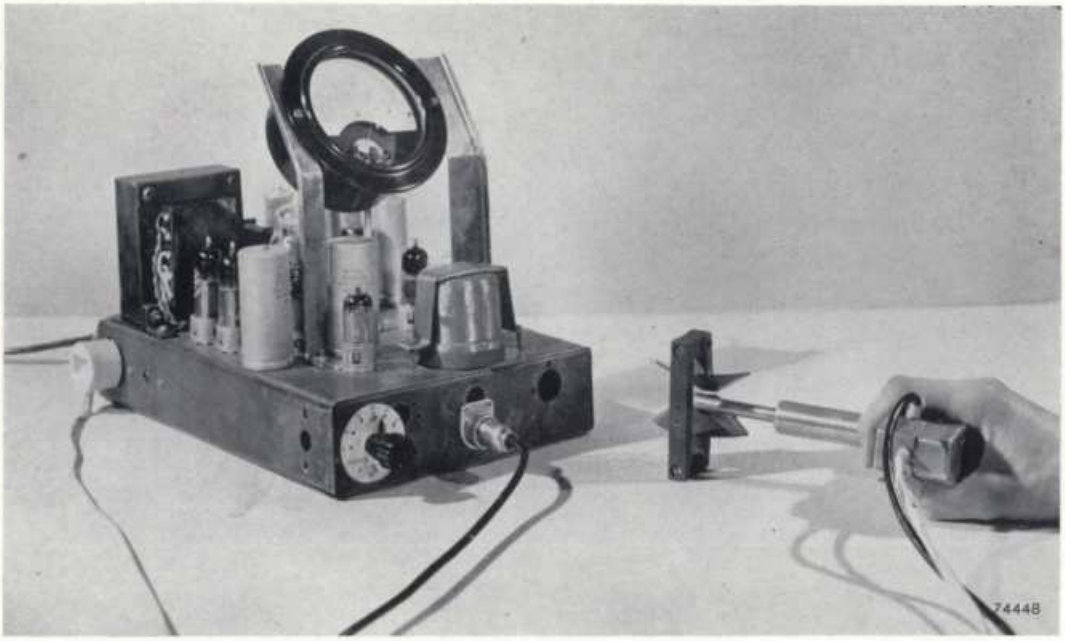


Fig. 3. De veldsterktemeter in werking. Rechts: de experimentator houdt het motortje in de hand. Het meetspoeltje, omgeven door een beschermbus, is geschoven tussen de poolschoenen van de magneet waarvan de veldsterkte wordt gemeten. Links: de versterker met aanwijsinstrument.

weerstand van het spoeltje zelf en de inductieve impedantie gevormd door de transformator. Bij toenemende frequentie neemt deze inductieve impedantie toe en daarmee het deel van de spanning dat over de transformator komt te staan. In de buurt van 50 Hz blijkt in ons geval de verhouding ongeveer recht evenredig te zijn met de frequentie [2]). Daar de in het meetspoeltje geïnduceerde spanning zelf ook evenredig is met de frequentie (= toerental), is de spanning aan het rooster der

[2]) Het is wel mogelijk een transformator te construeren waarbij onder de gegeven omstandigheden de spanningsverhouding in het gebied van 50 Hz reeds practisch onafhankelijk is van de frequentie.

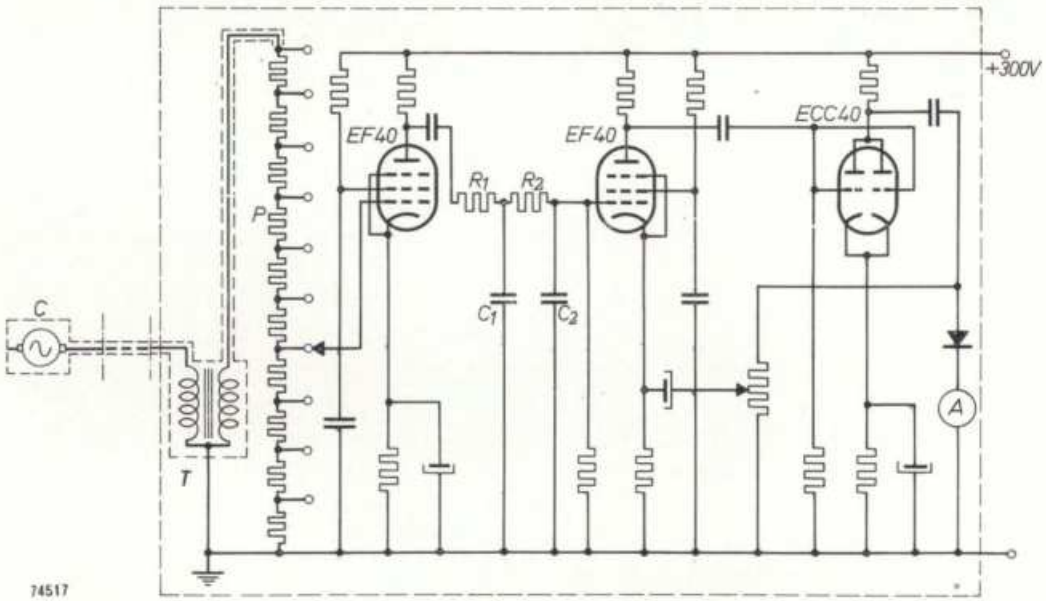


Fig. 4. Schema van de versterker. De spanning die in het meetspoeltje c wordt opgewekt, wordt via een magnetisch afgeschermde ingangstransformator T toegevoerd aan de versterker. Door het dubbele RC-filter (R_1-C_1 en R_2-C_2) tussen de eerste en de tweede buis wordt de frequentiekarakteristiek van de versterker zo beïnvloed dat de aanwijzing onafhankelijk wordt van de netfrequentie. P is de geijkte verzwakker waarmee de verschillende meetgebieden worden ingesteld. A is het afleesinstrument.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

eerste buis van de versterker ongeveer evenredig met het kwadraat van de netfrequentie. Om te vermijden dat hierdoor, in het geval van schommelingen in de netfrequentie, grote meetfouten ontstaan, hebben wij de versterker een zodanige frequentiekarakteristiek gegeven dat de versterking in het gebied van 50 Hz kwadratisch met de frequentie afneemt. Hiertoe dienen twee *RC*-filters, die tussen de eerste en tweede versterkbuis zijn geschakeld (fig. 4).

De ingangstransformator is magnetisch goed afgeschermd, om storingen door magnetische lekvelden van de voedingstransformator te voorkomen. Deze velden hebben immers dezelfde frequentie als het nuttige signaal. Op fig. 3 is vooraan op het chassis de afgeschermde transformator zichtbaar.

Er is een gestabiliseerd voedingsapparaat voor de versterker gebruikt, om te verhinderen dat netspanningsvariaties invloed hebben op de versterking.

De gehele apparatuur wordt afgeregeld door het draaiende spoeltje in een magneetveld van bekende sterkte te plaatsen. Op fig. 2 ziet men achteraan de ijkmagneet, die dit veld levert, liggen. De ruimte tussen de poolschoenen is opgevuld met hout, waarin een gat is geboord, zodanig dat de beschermbus van de „Perspex"-as er juist in past. Men regelt dan de versterking door middel van een variabele tegenkoppeling zodanig dat de meter de bekende veldsterkte aanwijst. Doordat de gebruikte verzwakker geijkt is, is nu de aanwijzing in alle andere meetgebieden ook goed.

In de gevoeligste stand komt volle uitslag van de wijzer overeen met een inductie van $3 \cdot 10^{-4}$ Wb/m² (3 gauss), in de ongevoeligste stand met 3 Wb/m² (30 000 gauss). De onnauwkeurigheid is ongeveer 3% van de schaal-eindwaarde, behalve in de laagste meetgebieden (die van $3 \cdot 10^{-4}$ Wb/m² en van 10^{-3} Wb/m²). Bij deze kleine inducties wordt enige hinder ondervonden van een meteruitslag die niet van het te meten magneetveld afkomstig is en die overeenkomt met ongeveer $3 \cdot 10^{-5}$ Wb/m².

II. METING VAN HET VELD LANGS DE AS VAN MAGNETISCHE ELECTRONENLENZEN

Bij het onderzoek van de afbeeldingseigenschappen van magnetische electronenlenzen, zoals die bijv. in electronenmicroscopen worden gebruikt, is het nodig het veldverloop langs de as te kennen. Het veld van een magnetische electronenlens is in principe steeds rotatiesymmetrisch; zulke velden hebben de bijzondere eigenschap dat zij geheel bepaald zijn door het veldverloop langs de symmetrie-as. Kent men dit verloop, dan kan men ook het veld buiten de as berekenen.

De bewering geldt voor een deel van de ruimte waarin geen electrische stromen lopen en waarin zich geen gemagnetiseerde materie bevindt. Hieraan is voldaan in de omgeving van de as van een magnetische electronenlens. In zo'n ruimte kan de magnetische inductie afgeleid worden van een scalaire potentiaal, die voldoet aan de vergelijking van Laplace. In de potentiaaltheorie wordt de genoemde eigenschap bewezen.

Een magnetische electronenlens bestaat in principe uit een spoel, omgeven door een weekijzeren mantel (zie de schets, *fig. 1a*). Het veld langs de as heeft een klokvormig verloop (fig. 1*b*). Berekening van dit veld is bij benadering mogelijk, maar de nauwkeurigheid van de berekening is meestal niet groot genoeg voor het beoogde doel, vooral niet als verzadigingsverschijnselen in het ijzer optreden. Wil men bijv. de sferische aberratie van een lens met enige precisie berekenen, dan mag de onnauwkeurigheid waarmee het veld bekend is niet groter zijn dan 1%. Het is daarom van belang het veldverloop rechtstreeks te meten aan de werkelijke lens of aan een op schaal vergroot of verkleind model.

In het volgende geven wij een beschrijving van een methode volgens welke de inductie langs de as van een magnetische electronenlens snel en met voldoende nauwkeurigheid kan worden gemeten. Het is een variant van een methode die door Van Ments en Le Poole is gebruikt, eveneens voor metingen aan magnetische electronenlenzen [1]).

Van Ments en Le Poole maten de statische kracht die op een meetspoeltje in het te meten veld wordt uitgeoefend, als door het spoeltje een constante gelijkstroom vloeit. Het meetspoeltje heeft een bijzondere vorm. Het bestaat uit een lange dunne solenoïde, die in het midden *M* een omkeerpunt in de wikkelrichting vertoont (*fig. 2*). Bij de meting is de solenoïde zo opgesteld dat haar as samenvalt met de as van de electronenlens. De solenoïde is zo lang dat beide uiteinden zich bevinden op plaatsen waar het veld nagenoeg nul is.

Het principe van de meting kan men eenvoudig als volgt beschrijven.

[1]) M. van Ments en J. B. Le Poole, Numerical computation of the constants of magnetic electron lenses, Appl. sci. Res. **B 1**, 3-17, 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Iedere winding van de solenoïde kan, wat haar magnetisch gedrag betreft, vervangen worden door een vlakke plaat, homogeen gemagnetiseerd loodrecht op haar oppervlak. De plaat heeft dezelfde dikte en omtrek als de winding. Aan de ene zijde draagt de plaat een gelijkmatig verdeelde positieve, aan de andere zijde eenzelfde negatieve magnetische lading. De aan elkaar grenzende positieve en negatieve ladingen van de opeenvolgende platen neutraliseren elkaar. Ter plaatse van het omkeerpunt in de wikkeling grenzen echter ladingen met hetzelfde teken aan elkaar, zodat ze elkaar daar versterken. Ook op de eindvlakken van de solenoïde houden we magnetische ladingen over. Deze bevinden zich in een veld nul en ondervinden dus geen krachten. De lading in M ondervindt echter een kracht, evenredig met de waarde van de inductie daar ter plaatse. De grootte van de magnetische ladingen is evenredig met de stroom door de solenoïde. Is de stroom constant, dan is dus de kracht op de solenoïde een maat voor de inductie in M.

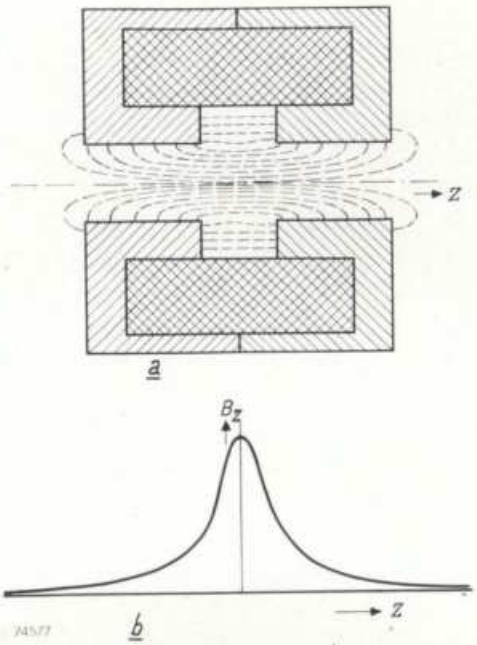


Fig. 1. *a*) Schematische voorstelling van een magnetische electronenlens. De lens bestaat uit een spoel die bijna volledig is omgeven door een weekijzeren mantel. Alleen in de boring is de mantel over korte afstand onderbroken. Het veld wordt grotendeels in de boring, ter plaatse van de onderbreking, geconcentreerd.
b) De magnetische inductie B_z op de as van de lens uit (*a*) heeft een klokvormig verloop.

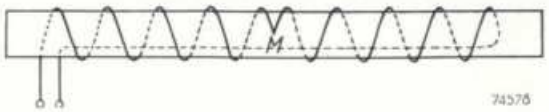


Fig. 2. Bij de meting van het veld van een magnetische electronenlens wordt als meetelement een lange dunne solenoïde gebruikt, waarvan de wikkelrichting in het midden M omkeert. De as van de solenoïde laat men samenvallen met de as van de lens. De kracht op de solenoïde is evenredig met de magnetische inductie in M en met de stroom door de solenoïde. De verhouding van lengte tot dikte is veel groter dan in de figuur is getekend.

Eigenlijk is de kracht op de solenoïde niet evenredig met de inductie op de as in M, maar met de flux Φ_M die in M per winding wordt omvat. Want als H_{ax} en B_{ax} resp. de axiale componenten zijn van de magnetische veldsterkte en de magnetische inductie, en als σ de (constante) dichtheid van de magnetische oppervlaktelading in M is, dan is de kracht op de solenoïde gelijk aan

$$K = \int \sigma H_{ax}\, dO = \frac{\sigma}{\mu_0} \int B_{ax}\, dO = \frac{\sigma}{\mu_0} \Phi_M.$$

De integratie moet worden uitgevoerd over de doorsnede van de solenoïde in M. μ_0 is de permeabiliteit van vacuum.

Φ_M is natuurlijk evenredig met de gemiddelde waarde van B_{ax} over de doorsnede, zodat we eigenlijk deze gemiddelde waarde meten.

Het is mogelijk hiervoor te corrigeren. Kiest men de z-coördinaat langs de symmetrie-as en zijn Φ_z en B_z resp. de per winding (straal r) omvatte flux en de magnetische inductie op de as ter plaatse z, dan kan met behulp van de potentiaaltheorie worden afgeleid dat:

$$\Phi_z = \pi r^2 \left\{ B_z - \frac{r^2}{8} \frac{d^2 B_z}{dz^2} + \frac{r^4}{192} \frac{d^4 B_z}{dz^4} - \dots \right\}.$$

Hier is dus Φ_z uitgedrukt in een machtreeks in r. B_z is de grootheid die wij zoeken, Φ_z de grootheid die wij meten. De differentiaalquotienten d^2B_z/dz^2 enz., die in de correctietermen voorkomen, zijn eigenlijk onbekend. Wij kunnen echter hierin bij benadering B_z wel vervangen door zijn gemiddelde waarde $\Phi_z/\pi r^2$ over een windingsoppervlak. Dan wordt:

$$B_z = \frac{1}{\pi r^2} \left\{ \Phi_z + \frac{1}{8} \frac{d^2 \Phi_z}{dz^2} r^2 - \frac{1}{192} \frac{d^4 \Phi_z}{dz^4} r^4 + \dots \right\}. \quad (1)$$

Φ_z wordt gemeten als functie van z. Dan kunnen ook de differentiaalquotienten als functie van z worden bepaald, zodat de correcties kunnen worden aangebracht. Men ziet dat deze correcties kleiner zijn naarmate r, de straal van de solenoïde, kleiner wordt gekozen.

Men kan de solenoïde horizontaal ophangen aan draden (*fig. 3*). Zij krijgt dan, als men er een gelijkstroom door stuurt, ten gevolge van de er op werkende kracht een uitwijking, die men bijv. langs optische weg kan meten. Deze uitwijking is een maat voor de inductie ter plaatse van het omkeerpunt in de wikkeling. In ons geval echter is een iets andere opstelling gekozen. De meetsolenoïde wordt aangesloten op een wisselspanningsbron. Met een regelweerstand kan een bepaalde wisselstroom door de solenoïde worden ingesteld, die gedurende de meting constant wordt gehouden. De solenoïde ondervindt nu een periodieke kracht, evenredig met de inductie ter plaatse van het omkeerpunt, en voert daardoor een trilling uit. Voor het meten van de amplitude van deze trilling

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt gebruik gemaakt van het piëzo-electrische kristal van een normale Philips grammofoonopnemer. Door gebruik te maken van de mogelijkheid het signaal te versterken, wordt de meting zowel nauwkeuriger als eenvoudiger.

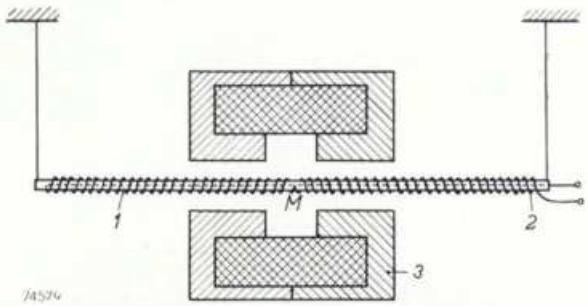
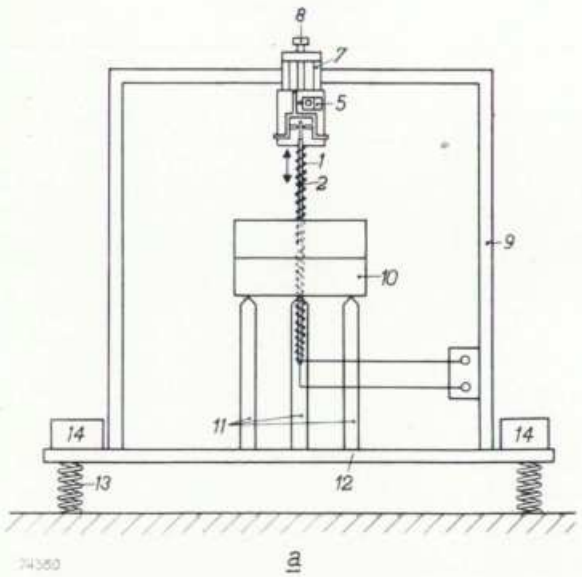


Fig. 3. Principe van de opstelling van Van Ments en Le Poole [1]). De staaf *1*, waarom de meetsolenoïde *2* is gewikkeld, is horizontaal opgehangen aan draden, concentrisch met de electronenlens *3*. De solenoïde ondervindt in het veld van de lens een horizontale kracht. De verplaatsing die daardoor ontstaat, wordt langs optische weg gemeten en is een maat voor de veldsterkte in *M*.

De solenoïde is in dit geval verticaal opgehangen aan twee kleine, horizontale bladveertjes (*fig. 4*). Aan deze bladveertjes is tevens een verticaal metalen plaatje bevestigd, dat de verticale trilling van de solenoïde meemaakt. Dit plaatje is in wrijvingscontact met de saffiernaald van de opnemer. Voert het plaatje bij een meting de gewenste trilling uit, dan wordt de saffiernaald door de wrijving meegenomen. Bij heftige bewegingen daarentegen (bijv. door stoten) glijdt de naald over het plaatje, waardoor beschadiging wordt voorkomen. De bladveertjes en de opnemer zijn gemonteerd op een verticale slede. De geleiding van de slede is bevestigd aan een raam (*9* in fig. 4*a*). Bij het uitvoeren van een meting wordt eerst de lens zo opgesteld dat haar as samenvalt met die van de solenoïde. Door de slede, en daarmee de solenoïde, verticaal te verschuiven, kan men de inductie meten als functie van de plaats op de as van de lens.

Behalve de gewenste bewegingen kan de solenoïde met het wrijvingsplaatje ook gemakkelijk ongewenste bewegingen gaan uitvoeren ten opzichte van de opnemer, bijv. als gevolg van trillingen van de tafel waarop de apparatuur is opgesteld. Het blijkt dat deze storende trillingen zo'n invloed hebben dat het elimineren er van beslissend is voor de practische bruikbaarheid van de methode.



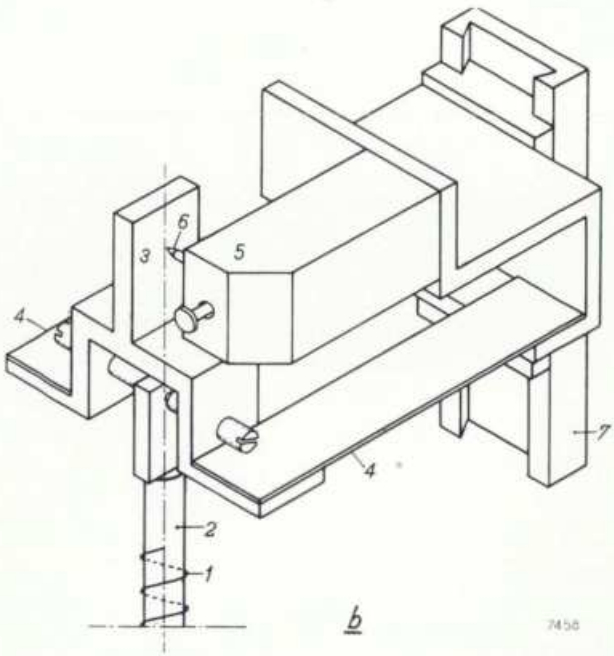


Fig. 4. Opstelling met verticaal opgehangen solenoïde. De solenoïde *1* is gewonden op een aluminiumstaaf *2*, die tevens dienst doet als teruggeleider voor de stroom. Een wisselstroom die door de solenoïde wordt gestuurd, brengt deze, met de staaf *2* en het plaatje *3*, in verticale trilling. Deze trilling wordt mogelijk gemaakt doordat het systeem is bevestigd aan de twee horizontale bladveertjes *4* (zie details in *b*). De amplitude van de trilling is een maat voor de te bepalen magnetische inductie en wordt gemeten met behulp van een normale Philips grammofoonopnemer *5*. De saffiernaald *6* van de opnemer rust tegen het verticale plaatje *3*. Bij de normale meting, waarbij de amplitude slechts enkele honderdsten millimeters bedraagt, neemt het vlakje door de wrijving de naald mee. Bij stoten echter treedt slip op, waardoor beschadiging wordt voorkomen. Het omkeerpunt van de solenoïde kan in het gewenste meetpunt worden gebracht door de ophanginrichting in haar geheel te verschuiven langs de geleiding *7*, wat gebeurt met de draadspil *8* (niet getekend in *b*). De geleiding is vast verbonden met het raam *9*. De magnetische lens *10* die wordt doorgemeten, rust op stelschroeven *11* om haar verticaal te stellen. De grondplaat *12* is trillingsvrij opgesteld op vier stalen veren *13*. De gewichten *14* dienen om de trillingstijd van het geheel te vergroten tot 0,5 sec.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Daarom is de gehele meetapparatuur, uitgezonderd de versterker en het aanwijsinstrument, geplaatst op een plaat die door vier verticale drukveren is ondersteund (fig. 4*a*). Door het toevoegen van gewichten, die op de plaat werden gezet, is de

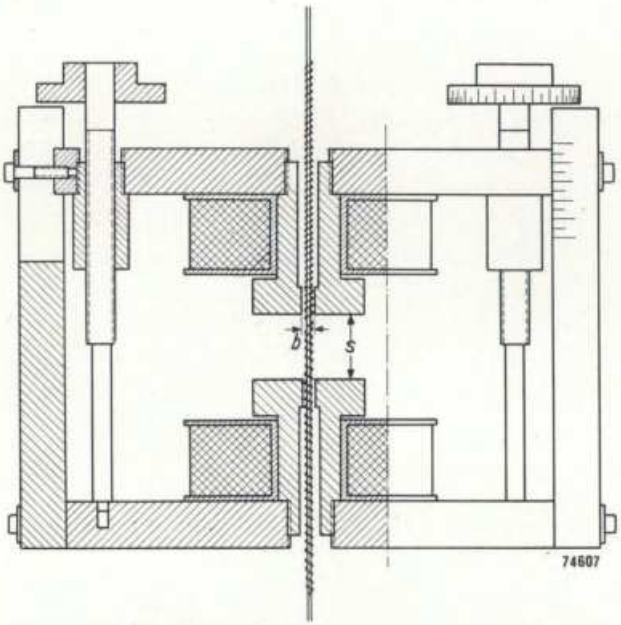


Fig. 5. Magnetische electronenlens met een lensboring van diameter b en met een verstelbare poolschoenafstand s. Deze lens is speciaal ontworpen om de invloed van de verhouding s/b op de lenseigenschappen na te gaan. s/b kan hier gevarieerd worden van 0 tot 8.

eigen frequentie van het geheel omlaag gebracht tot ongeveer $\nu_0 = 2$ Hz. Daar de laagste frequenties die gewoonlijk worden gevonden bij trillingen van vloeren, muren en tafels, liggen tussen 15 en 20 Hz, zijn de frequenties ν van deze storende trillingen steeds belangrijk groter dan ν_0. De amplitude van zo'n trilling wordt dan, verzwakt in de verhouding $(\nu_0/\nu)^2$, overgebracht op de meetapparatuur [2]). De storende invloed wordt daardoor verminderd met een factor groter dan 100.

Omdat wij ons er voor interesseerden hoe de focusserende eigenschappen van een lens afhangen van de poolafstand s en de diameter van de boring b, hebben wij een speciale lens geconstrueerd, waarbij de verhouding s/b binnen een ruim gebied kan worden gevarieerd, nl. tussen 0 en 8 (*fig. 5*). In *fig. 6* vindt men ten slotte de resultaten van metingen aan deze lens. De metingen geven een contrôle op de juistheid van de berekeningen en verschaffen inzicht in de invloed die de verzadiging van het ijzer heeft.

De differentiaalquotienten, dB_z/dz en d^2B_z/dz^2, waarvan het tweede voorkomt in de correctietermen in de uitdrukking (1) voor B_z, kunnen ook rechtstreeks gemeten worden, na een kleine wijziging in de beschreven apparatuur. In plaats van de lange solenoïde brengt men een kort spoeltje aan om de aluminiumstaaf, die aan de bladveertjes hangt (*2* in fig. 4). Het spoeltje kan men vervangen denken door gelijkmatig verdeelde positieve en negatieve magnetische ladingen op zijn twee eindvlakken. Omdat de afstand van deze vlakken een constante van het apparaat is, is deze kracht evenredig met dB_z/dz ter plaatse van het spoeltje.

Voert men het korte spoeltje uit met een omkeerpunt van de wikkeling in het midden, dan is de ondervonden kracht evenredig met het verschil van de krachten op de beide spoelhelften. Deze kracht is dus evenredig met het verschil van de waarden van dB_z/dz ter plaatse van de twee helften en dus ook evenredig met d^2B_z/dz^2 ter plaatse van de spoel. In principe kan men door combinaties van twee spoelen met omkeerpunt weer d^3B_z/dz^3 meten, enz.

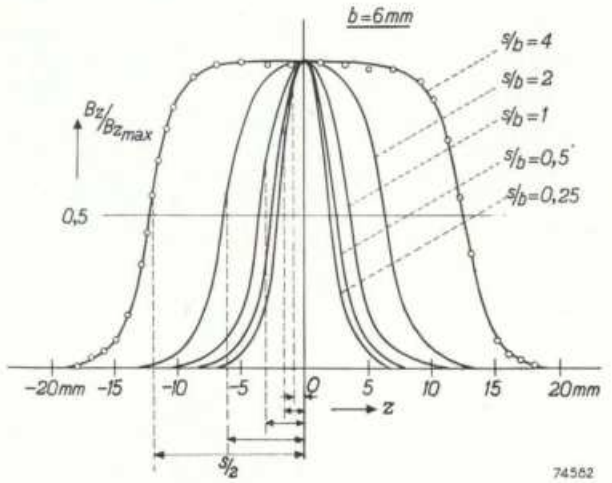


Fig. 6. Resultaten van metingen aan de lens van fig. 5. Uitgezet is de relatieve waarde van de magnetische inductie $B_z/B_{z_{max}}$ op de as, voor verschillende waarden van s/b.

[2]) J. A. Haringx, Trillingsvrije opstellingen met hulpmassa, Philips techn. T. **9**, 16-23, 1947.

III. METING MET BEHULP VAN PROTONRESONANTIE

De physische grondslagen van de beide in het voorafgaande beschreven methodes zijn zo algemeen bekend dat zij op deze plaats niet verder behoefden te worden besproken. Dit is anders bij de derde methode — een methode die het mogelijk heeft gemaakt magneetvelden met zeer grote nauwkeurigheid te meten. Zij is een nevenresultaat van de nieuwere ontwikkeling op het terrein van het atomaire magnetisme, waarvan wij hier een korte schets zullen geven. Daarbij zullen wij ons beperken tot die aspecten die voor het begrijpen van de meetmethode onmisbaar zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Kernspinmagnetisme en protonresonantie

Men kan het principe van de meetmethode op eenvoudige wijze globaal uiteenzetten door gebruik te maken van de taal van de quantumtheorie. Het proton (kern van het waterstofatoom) bezit een constant mechanisch impulsmoment, de zg. spin. Men denkt daarbij aan een tolbeweging van het proton (to spin = tollen). Bovendien heeft het proton een constant magnetisch moment μ_p. De vectoren van de spin en van het magnetisch moment hebben steeds dezelfde richting, wat voor de hand ligt als men zich het proton als een roterende electrische lading voorstelt.

Volgens de quantumtheorie kan een proton in een magneetveld B_0 slechts twee standen innemen, nl. die waarbij het magnetisch moment, en dus ook de spin, parallel of antiparallel staat aan B_0. Het kost een energie $\Delta E = 2\,\mu_p B_0$ om een proton van de parallelle in de antiparallelle stand te brengen [1]). De antiparallelle spins bezitten dus een energie die een bedrag $2\mu_p B_0$ hoger ligt dan het niveau waarop zich de parallelle spins bevinden. De verdeling van de spins over de energieniveaus zal in overeenstemming zijn met de wet van Boltzmann, die zegt dat de bezettingsgraad van een energieniveau evenredig is met $e^{-E/kT}$. Hierin is E de energie van het niveau en k is de constante van Boltzmann. Hoe groter de energie, des te geringer dus de bezetting. Stellen N^+ en N^- respectievelijk de aantallen kernspins voor op het bovenste en het onderste niveau, dan is dus

$$\frac{N^+}{N^-} = e^{-\Delta E/kT} = e^{-2\mu_p B_0/kT}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Doordat gewoonlijk $2\mu_p B_0 \ll kT$, is $N^- - N^+$ zeer klein ten opzichte van het totale aantal protonen $N^- + N^+$ [2]).

[1]) Dat wij hier B schrijven in plaats van H komt door onze definitie van het magnetisch moment. Wij denken ons het proton als een kringstroompje en karakteriseren het locale magnetische veld (in vacuum) door de magnetische inductie B. Het magnetische moment van een vlakke kringstroom i die een vlak oppervlak O omrandt, wordt gedefinieerd als $m = i\,O$. Het koppel dat zo 'n kringstroom ondervindt in een magneetveld B waarvan de veldlijnen een hoek ϑ maken met de normaal op O, is $iOB \sin \vartheta$. Soms wordt het magnetische moment gedefinieerd als $m' = \mu_0 iO = \mu_0\, m$. De uitdrukking voor het ondervonden koppel wordt dan $m'B/\mu_0 = m'\,H$ (H = magnetische veldsterkte).

Tot deze laatste uitdrukkingen voor het magnetische moment en het ondervonden koppel wordt men automatisch geleid als men het magnetische moment ontstaan denkt door combinatie van gelijke maar tegengestelde magnetische ladingen. Wij houden ons echter aan de eerstgenoemde definitie (zie bijv. Slater en Frank, Electromagnetism, Mac Graw Hill, New York 1947, blz. 59).

[2]) $\mu_p = 1{,}410 \cdot 10^{-26}$ A·m² en $k = 1{,}375 \cdot 10^{-23}$ J/graad. Bij een veld $B_0 = 1$ Wb/m² (10 000 gauss) en een temperatuur van 300 °K is $2\,\mu_p B_0/kT \approx 10^{-5}$ en N^+/N^- is dus zeer weinig kleiner dan 1.

Brengt men loodrecht op het veld B_0 een zwak wisselveld met een frequentie ν aan: $B_1 \cos 2\pi\nu t$, dan kan energie uit dit veld worden opgenomen of er aan afgegeven, in hoeveelheden die een geheel veelvoud zijn van het energiequantum $h\nu$. Hierin is h de constante van Planck. Heeft ν de waarde waarbij voldaan is aan de relatie $h\nu = 2\mu_p B_0$, dan bevat één energiequantum juist de energie, nodig om één spin van de parallelle in de antiparallelle stand te doen overgaan. In dit geval is de kans dat de parallelle spins energiequanta absorberen, en daarbij overgaan in antiparallelle spins, het grootst. Men zegt dat nu resonantie optreedt en noemt de frequentie waarbij het gebeurt, de resonantiefrequentie ν_r. Dus geldt:

$$B_0 = \frac{h}{2\mu_p}\,\nu_r. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Principe van de meetmethode

Deze beschouwingen leiden nu als volgt tot een methode voor het meten van magnetische velden:

Men brengt protonen in het te meten veld B_0, in de vorm van kernen van de waterstofatomen in stoffen die veel waterstof bevatten. Loodrecht op dit veld brengt men een zwak wisselveld aan. De frequentie hiervan regelt men zo, dat aan de relatie (2) is voldaan. De boven besproken energieabsorptie, die juist bij deze resonantiefrequentie optreedt, wordt gebruikt als instelkenmerk. De apparatuur is daarom zo ingericht dat men het optreden van de energieabsorptie op een kathodestraaloscillograaf kan constateren. Daar de resonantiefrequentie volgens (2) samenhangt met B_0, is de meting van het magnetische veld nu teruggebracht tot een frequentiemeting. Doordat men hoge frequenties met geringe moeite zeer precies kan bepalen en het instelkenmerk zeer scherp blijkt te zijn, is deze methode voor het meten van een inductie veel nauwkeuriger dan de traditionele methodes.

Om magneetvelden met elkaar te vergelijken, is slechts een bepaling van de resonantiefrequenties in deze velden nodig. Men kan echter ook absolute metingen verrichten doordat de waarde van $h/2\mu_p$ nauwkeurig bekend is. Met ν_r in Hz geldt:

$$B_0 = 2{,}3489 \cdot 10^{-8}\,\nu_r \text{ Wb/m}^2 = 2{,}3489 \cdot 10^{-4}\,\nu_r \text{ gauss}. \quad (3)$$

Een resonantiefrequentie van 30 MHz treedt dus op in een veld van 0,7047 Wb/m² = 7047 gauss.

De waarde van $h/2\mu_p$ kan men zeer nauwkeurig afleiden uit het resultaat van metingen van Bloch en Jeffries [3]).

[3]) F. Bloch en C. D. Jeffries, A direct détermination of the magnetic moment of the proton in nuclear magnetons, Phys. Rev. **80**, 305-306, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Deze onderzoekers wilden de grootte van μ_p bepalen, waarbij zij gebruik maakten van de bovenbesproken protonresonantie. Het principe van hun meting was het volgende: daar protonen een electrische lading e dragen ($e = 1{,}6019 \cdot 10^{-19}$ coulomb), zullen zij, als zij bewegen in een homogeen magneetveld B_0, in een vlak loodrecht op de veldlijnen, ten gevolge van de Lorentz-kracht een cirkelvormige baan beschrijven. Zij doorlopen deze baan met een frequentie ν_c die gegeven wordt door:

$$\nu_c = \frac{eB_0}{2\pi M_p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

(M_p = de massa van het proton = $1{,}6722 \cdot 10^{-27}$ kg).

Heeft men nu een cyclotron met een magneetveld van de sterkte B_0, dan is ν_c de frequentie die de spanning op de electrodes van het cyclotron moet hebben opdat dit protonen kan versnellen [4]). Bloch en Jeffries gebruikten een speciaal geconstrueerd klein cyclotron en bepaalden de frequentie waarbij dit met protonen functionneerde. Dit was de frequentie ν_c. In dit zelfde cyclotronveld bepaalden zij vervolgens de protonresonantiefrequentie ν_r, waarvoor volgens (2) geldt:

$$\nu_r = \frac{2\mu_p B_0}{h} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Uit (4) en (5) volgt:

$$\frac{h}{2\mu_p} = \frac{\nu_c}{\nu_r} \cdot \frac{2\pi M_p}{e}.$$

De aardigheid is dat de veldsterkte B_0, die niet zo nauwkeurig gemeten kan worden, wegvalt. Volgens de metingen van Bloch en Jeffries is $\nu_r/\nu_c = 2{,}7924 \pm 0{,}0002$. Met de hierboven vermelde waarden van e en M_p vindt men $h/2\mu_p = 2{,}3489 \cdot 10^{-8}$, welk getal in formule (3) is ingevuld. (Doordat h bekend is, kan men ook de waarde van μ_p zelf bepalen.)

Voordat wij nu tot een beschrijving van de meetapparatuur overgaan, moeten wij nog twee punten wat nader bespreken, nl. de grootte van de energieabsorptie en de „lijnbreedte" van deze absorptie.

Grootte van de energieabsorptie

Zoals reeds is opgemerkt, bestaat er voor iedere parallelle spin een zekere kans dat hij uit het wisselveld een energiequantum opneemt en daarbij omklapt in de antiparallelle stand. Toch blijkt dit, als men de zaak nader beschouwt, op zich zelf niet voldoende om de waargenomen energieabsorptie te verklaren. Immers, er bestaat voor iedere antiparallelle spin een even grote kans dat hij een energiequantum afgeeft aan het wisselveld en daarbij in de parallelle stand overgaat. Dit laatste proces noemt men gestimuleerde emissie. Beide kansen zijn evenredig met het aantal energiequanta dat in het veld beschikbaar is, dwz. met de energiedichtheid van het wisselveld, dus met B_1^2. Nu is het aantal parallelle spins N^+ groter dan het aantal antiparallelle N^- (Boltzmann-verdeling, formule 1). Daardoor gaan er aanvankelijk meer parallelle spins over in antiparallelle dan omgekeerd. Het gevolg is dat N^- toeneemt ten koste van N^+, maar naarmate N^- en N^+ tot elkaar naderen, gaat dit langzamer. Indien er niets anders gebeurde, zou ten slotte, als $N^- = N^+$, even veel energie uit het wisselveld worden geabsorbeerd als het weer terug krijgt en de netto absorptie zou dan nul zijn. Er zou dus alleen gedurende de tijd dat N^- en N^+ tot elkaar naderen energieabsorptie plaats hebben. De aldus in totaal geabsorbeerde energie zou zo klein zijn dat wij hiervan practisch niets zouden merken.

Er is echter nog een ander mechanisme dat omklappen van de spins veroorzaakt. Bij dit mechanisme is de warmtebeweging betrokken. Er treedt een uitwisseling op van de magnetische energie die de protonen hebben in het magneetveld B_0 en de kinetische energie van de warmtebeweging. Dit proces streeft ernaar, de oorspronkelijk bestaande Boltzmann-verdeling (1) van parallelle en antiparallelle spins te herstellen. De spins geven derhalve gemiddeld energie af aan de warmtebeweging. Er stelt zich een evenwichtstoestand in, waarbij de spins per seconde even veel energie uit het wisselveld opnemen als zij aan de warmtebeweging afgeven. Indien deze energieafgifte groot is, kan dus ook voortdurend een aanzienlijke energieabsorptie uit het wisselveld plaats vinden, die, zoals reeds is besproken, als instelkenmerk dient voor het bereiken van de resonantiefrequentie.

De protonen die bij de aanstonds te beschrijven meetapparatuur in resonantie worden gebracht, zijn niets anders dan de kernen van de waterstofatomen van een kleine hoeveelheid water. Bij zuiver water is echter de continue energieabsorptie uit het wisselveld te gering om een duidelijk instelkenmerk te leveren. De oorzaak hiervan is de zeer moeilijke overgang van de magnetische energie van de protonen naar de warmtebeweging. Deze overgang wordt verbeterd als men paramagnetische ionen in het water brengt, door er bijv. een ferri- of mangaanzout in op te lossen. Dank zij de sterke wisselwerking tussen de magnetische velden van de protonen en de sterke velden van deze ionen, wordt de energieoverdracht veel groter en daarmee ook de uit het wisselveld geabsorbeerde energie. Pas deze kunstgreep maakt het instelkenmerk duidelijk genoeg voor een practische meting.

[4]) Men zie bijv. W. de Groot, Cyclotron en synchrocyclotron, Philips techn. T. **12**, 65-72, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Lijnbreedte; scherpte van het instelkenmerk

Op het uitwendige veld B_0 wordt gesuperponeerd het naar plaats en tijd sterk wisselende veld van de protonen zelf en dat van de paramagnetische ionen. De protonen bevinden zich dus in velden die een zekere spreiding vertonen om de waarde van het

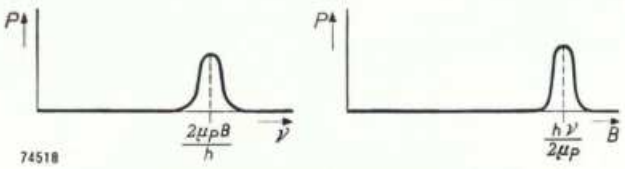


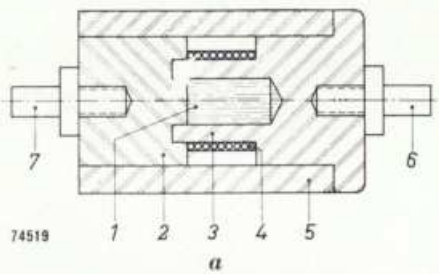
Fig. 1. Lijnbreedte bij protonresonantie in een magneetveld B met loodrecht gesuperponeerd hoogfrequent wisselveld (frequentie ν). Men kan op twee manieren op resonantie afstemmen, nl. 1) bij constant uitwendig veld B, door variëren van de frequentie van het hoogfrequente wisselveld, en 2) bij constante frequentie, door variëren van het uitwendige veld B. Bij de meting worden de twee methoden gecombineerd.
a) Bij constant uitwendig veld B treedt resonantie op in een frequentiegebiedje dat zich uitstrekt ter weerszijden van de frequentie die volgens formule (2) behoort bij het veld B. Men kan dan de lijnbreedte uitdrukken in Hz.
b) Bij constante frequentie treedt resonantie op in een gebiedje van de magnetische inductie dat zich uitstrekt ter weerszijden van de waarde die volgens formule (2) behoort bij deze frequentie. Men kan de lijnbreedte dus ook uitdrukken in Wb/m².

uitwendige veld B_0. Daardoor is er niet één resonantiefrequentie, maar er is een zeker frequentie**gebied** waar resonantie optreedt. Dit gebied ligt om de frequentie die behoort bij B_0. Men zegt dat de resonantie een zekere **lijnbreedte** heeft. Zet men namelijk de geabsorbeerde energie per tijdseenheid, bij constante waarde van B_0, uit als functie van de frequentie, dan bestaat het absorptiespectrum niet uit een scherpe lijn bij $\nu_r = 2\mu_p B_0/h$ (zie (2)), maar het ziet er uit als in *fig. 1a*. Ook als men de geabsorbeerde energie per tijdseenheid, bij constante frequentie, uitzet als functie van het uitwendige veld B, vindt men geen scherpe absorptielijn bij $B = h\nu_r/2\mu_p = B_0$, maar weer een gebiedje om B_0 (fig. 1*b*). Men kan, al naar men denkt aan fig. 1*a* of fig. 1*b*, de lijnbreedte uitdrukken in Hz of in Wb/m². Het verband tussen beide uitdrukkingswijzen volgt direct uit (3). 1 Hz komt overeen met $2{,}3489 \cdot 10^{-8}$ Wb/m².

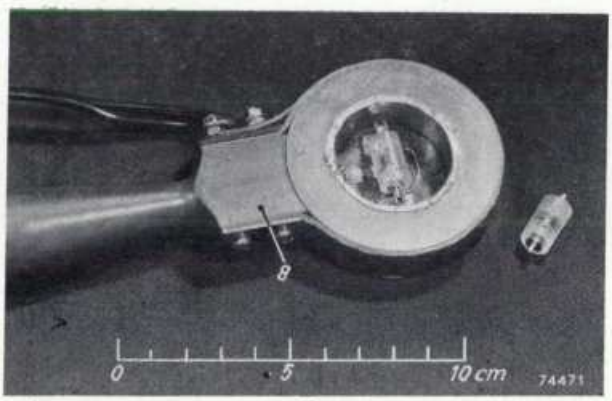
Voor zuiver water bedraagt de lijnbreedte ongeveer 10^{-6} Wb/m² (10^{-2} gauss). Door het toevoegen van paramagnetische ionen wordt de lijnbreedte vergroot, wat te verwachten was omdat nu de magnetische velden van deze ionen de spreiding van de locale velden om de waarde B_0 vergroten. Toch blijft, ook als men het zuivere water vervangt door een oplossing van een ferri- of mangaanzout, deze lijnbreedte nog zo gering (in ons geval 10^{-5} Wb/m² = 0,1 gauss), dat de scherpte van het instelkenmerk er niet noemenswaardig onder lijdt. Wij zien hieruit dat het instelkenmerk buitengewoon scherp is. De inhomogeniteit in de sterke magneetvelden die wij willen meten (orde van grootte 1 Wb/m²), over de ruimte die door het meetlichaam ingenomen wordt (ongeveer 30 mm³), is zelfs bij zeer homogene velden meestal minstens van dezelfde orde van grootte. Deze inhomogeniteit van het te meten veld zelf maakt, dat een nauwkeuriger meting toch geen zin zou hebben.

Beschrijving van de protonresonantie-apparatuur

Het hier behandelde apparaat is gebouwd volgens een schema dat reeds eerder is toegepast door Pound en Knight [5]). In een platte spoelhouder (*fig. 2*) bevindt zich een spoeltje, dat gelegd is om een klein cylindrisch vat van „Perspex". De as van het spoeltje ligt in het vlak van de spoel-



a



b

Fig. 2. *a*) Constructie van het oscillatorspoeltje. In de holte *1* (inwendige diameter 3 mm, lengte 4 mm) bevindt zich de oplossing van een ferri- of mangaanzout. De wanden worden gevormd door de „Perspex" onderdelen *2* en *3*. *4* is het eigenlijke oscillatorspoeltje. *5* is een „Perspex" huls. *6* en *7* zijn messingen aansluitpunten van het spoeltje.
b) Het oscillatorspoeltje bevindt zich in het hart van een platte spoelhouder *8*. De verbindingskabel naar de condensator van de oscillatorschakeling loopt door de steel van de spoelhouder. Links ziet men de toevoerdraden voor een hulpspoel, die voor een rimpel op het te meten veld zorgt. Rechts is nog een oscillatorspoeltje voor een ander meetgebied meegefotografeerd.

[5]) R. V. Pound en W. D. Knight, A radiofrequency spectrograph and magnetic field meter, Rev. sci. Instrum. **21**, 219-225, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

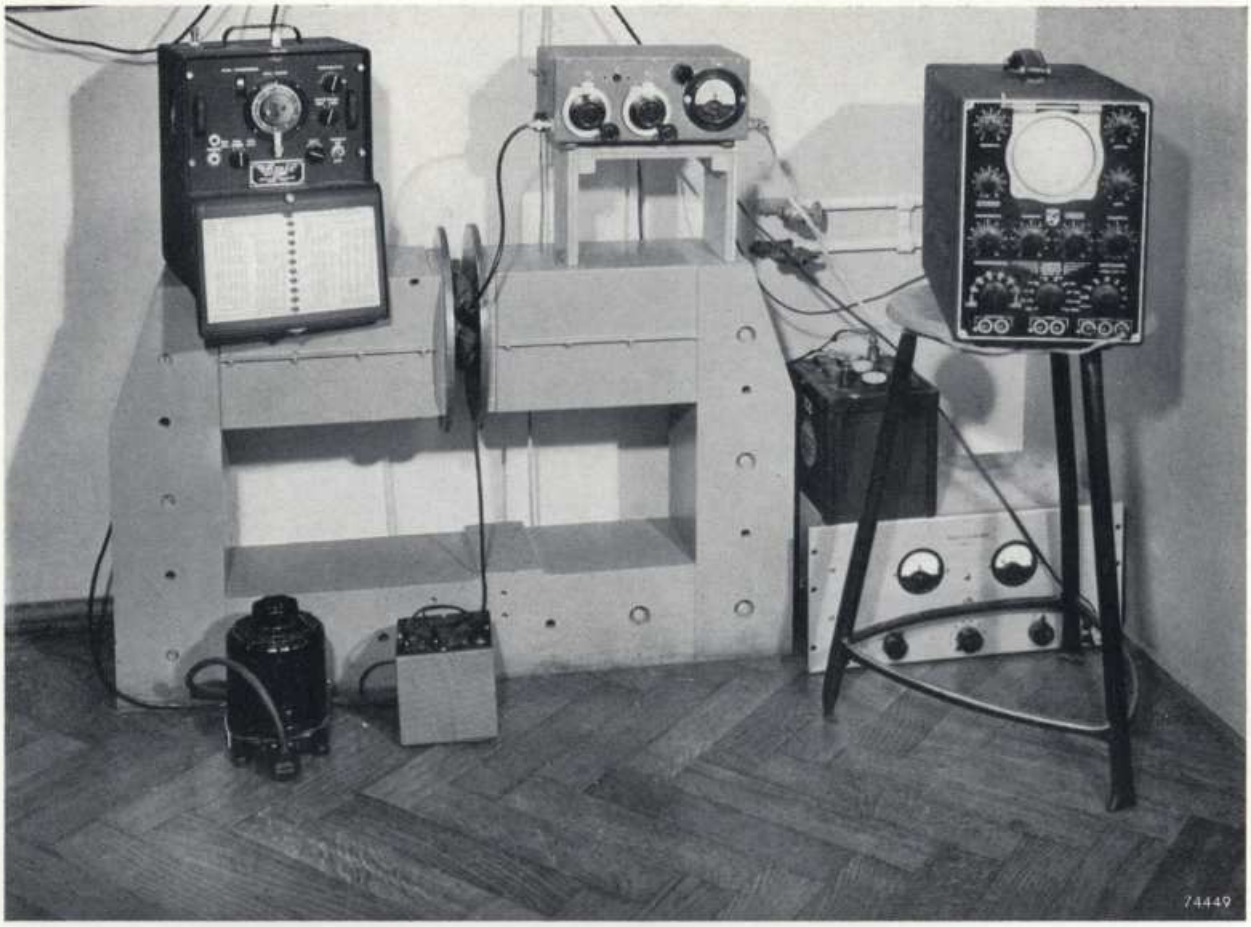


Fig. 3. Meting van het magneetveld van een grote permanente magneet (gewicht 600 kg) met behulp van de protonresonantie-apparatuur. De spoelhouder is tussen de poolschoenen van de magneet geschoven. Op de rechter poolschoen staat de electronische apparatuur, rechts de oscillograaf, waarop het instelkenmerk verschijnt. Rechts beneden een plaatstroom-apparaat en een accu, die de gloeistroom voor de buizen levert. Op de linker poolschoen staat de golfmeter waarmee de resonantiefrequentie wordt gemeten. Links op de grond een regeltransformator, die de rimpel op het te meten magneetveld levert.

houder. Brengt men de houder in het te meten magneetveld, zodanig dat zijn platte vlak loodrecht op de veldlijnen staat, en vloeit er een wisselstroom door het spoeltje, dan levert dit het zwakke wisselveld dat loodrecht staat op het te meten veld. Het „Perspex" vat is gevuld met water, waarin wat mangaansulfaat of ferrinitraat is opgelost, zodat een zekere concentratie van mangaan- of ferri-ionen is ontstaan. De waterstofatomen van het water bevatten de protonen die in het te meten veld in resonantie moeten worden gebracht; de paramagnetische mangaan- of ferri-ionen zorgen voor een goede doorgifte van de bij resonantie geabsorbeerde energie aan de warmtebeweging.

Door middel van een coaxiale, capaciteitsarme kabel is het spoeltje verbonden met de electronische apparatuur (*fig. 3*). De spoel vormt met een condensator C_1 en de kabel een afstembare oscillatorkring. De kring is aangesloten op de negatieve weerstand die door de weergegeven schakeling van de dubbele triode ECC 91 gevormd wordt en die de kring doet oscilleren (schema *fig. 4*). De frequentie van deze kring moet kunnen worden ingesteld op de resonantiefrequentie van de protonen. Om een groot frequentiegebied te kunnen bestrijken, is het spoeltje verwisselbaar uitgevoerd (fig. 2). Er zijn drie spoeltjes gemaakt met verschillende aantallen windingen.

Met behulp van de gemeenschappelijke kathodeweerstand van de beide triodes wordt de oscillator ingesteld op de rand van genereren. In deze toestand is de spanning op de kring zeer gevoelig voor de geringe dempingstoeneming die bij resonantie van de protonen optreedt.

In de rand van de spoelhouder bevindt zich een platte hulpspoel. Gedurende de meting vloeit hierdoor een wisselstroom van 50 Hz, wat het veld ter plaatse van het meetspoeltje doet wisselen tussen de waarden $B_0 + B_s$ en $B_0 - B_s$. B_0 stelt de waarde van het te meten veld voor. Variëren wij

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

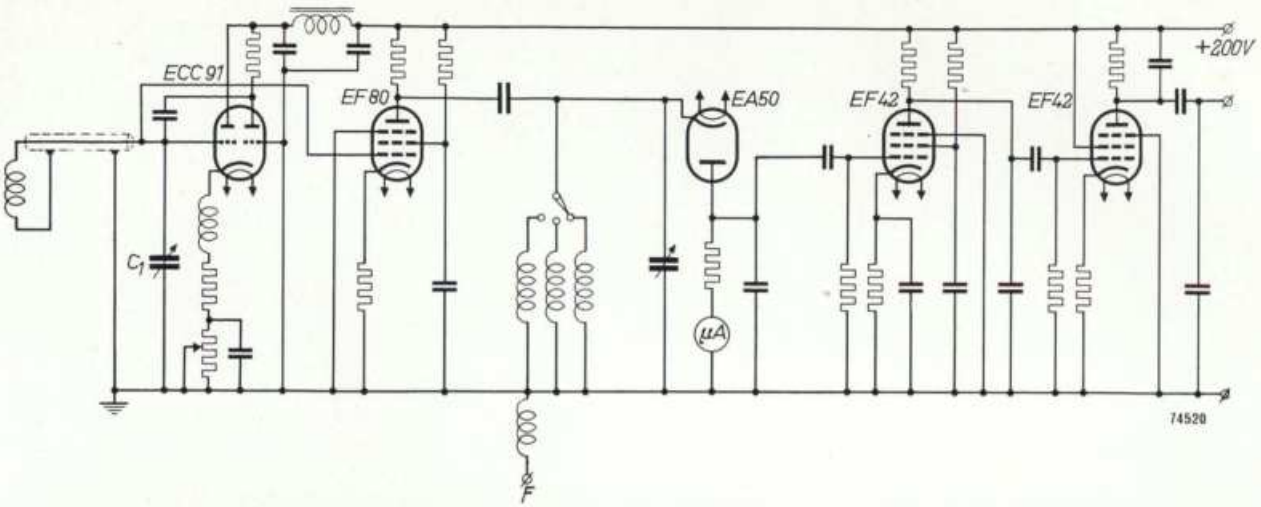


Fig. 4. Schema van de protonresonantie-apparatuur. Links het meetspoeltje, dat met de condensator C_1 en de dubbele triode, die als negatieve weerstand is geschakeld, een oscillator vormt. Rechts daarvan de schakeling voor versterking en detectie van de spanningsmodulatie op de oscillatorkring. F is het aansluitpunt voor de golfmeter.

nu de oscillatorfrequentie ν, dan zal tweemaal per periode van 1/50 sec protonresonantie, en daarmee gepaard energieabsorptie, optreden, zodra ν een waarde krijgt die voldoet aan (zie *fig. 5*):

$$B_0 + B_s \geqq \frac{h\nu}{2\mu_p} \geqq B_0 - B_s.$$

Tweemaal in deze periode zal dan namelijk voldaan zijn aan de resonantievoorwaarde $\nu = 2\mu_p B/h = \nu_r$ (zie formule 2) en op deze tijdstippen (in fig. 5 t_1 en t_2) verandert de spanning op de oscillatorkring met een gering bedrag. Ten gevolge van de eindige breedte van het resonantiegebied (aangegeven door horizontale stippellijnen) zijn de tijdstippen tot korte tijdsintervallen verbreed. Het hoogfrequente signaal op de kring wordt met deze spanningsdalingen gemoduleerd. De grondfrequentie van deze modulatie is dus 50 Hz.

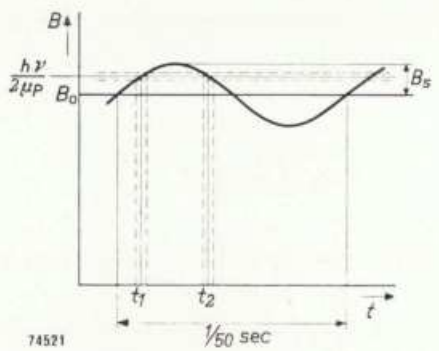


Fig. 5. Door de hulpspoel in de spoelhouder wordt op het te meten veld B_0 een rimpel met amplitude B_s gesuperponeerd. Bij gegeven frequentie ν van het hoogfrequente wisselveld treedt resonantie op als B een waarde heeft tussen de twee horizontale stippellijnen. Dit is tweemaal per periode van $^1/_{50}$ sec het geval, nl. rondom de tijdstippen t_1 en t_2. Op de oscillograaf zien we derhalve absorptiepieken op de plaatsen die met deze tijdstippen corresponderen. Laten wij in de getekende situatie, waarbij $h\nu/2\mu_p > B_0$, de rimpelamplitude afnemen, dan schuiven t_1 en t_2 naar toe. Op de oscillograaf zien wij de absorptiepieken naar elkaar toe schuiven, samenvallen en verdwijnen.

Dit signaal wordt eerst versterkt met een buis EF 80, die in de anodeketen een afgestemde kring heeft met een draaicondensator en drie omschakelbare spoeltjes, die corresponderen met de verschillende meetspoeltjes die in de spoelhouder gezet kunnen worden. Het signaal wordt daarna gelijkgericht en afgevlakt door een combinatie van een condensator met een weerstand, die een kleine tijdconstante heeft teneinde de piekjes, die met frequentie 50 Hz optreden, niet te verzwakken. Ten slotte wordt het signaal, dat nu alleen nog eventuele absorptiepiekjes bevat, nogmaals versterkt en toegevoerd aan een kathodestraaloscillograaf. De tijdasspanning is gesynchroniseerd met de spanning van 50 Hz die op de hulpspoel staat. Op de oscillograaf ziet men, als aan de resonantievoorwaarde is voldaan, twee absorptiepiekjes aanzienlijk boven het ruisniveau. (In *fig. 6* ziet men tweemaal twee piekjes, doordat de tijdasfrequentie daar 25 Hz was.)

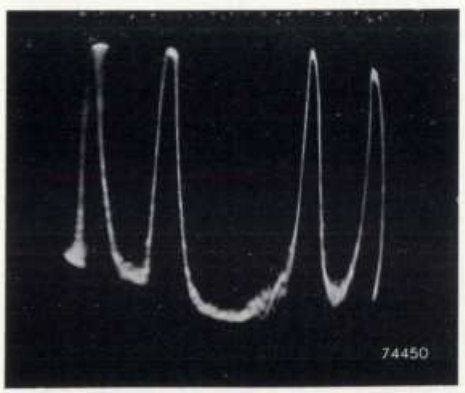


Fig. 6. Oscillogram van de modulatie van de oscillatoramplitude. De tijdasspanning had hier een frequentie van 25 Hz, waardoor er tweemaal twee absorptiepieken te zien zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om een magneetveld B_0 te meten, laat men de stroom door de hulpspoel langzaam afnemen. In het geval van fig. 5, waar de frequentie een te hoge waarde heeft, ziet men dan de beide piekjes naar elkaar toe schuiven, samenvallen en vervolgens verdwijnen. Heeft echter de frequentie de waarde $\nu_r = 2\mu_p B_0/h$, die juist bij B_0 behoort, dan blijven de piekjes op hun plaats (*fig. 7*). Ten gevolge van de eindige breedte van het resonantiegebied verbreden de piekjes zich als B_s afneemt. Als de rimpel op B_0 geheel binnen het resonantiegebied valt

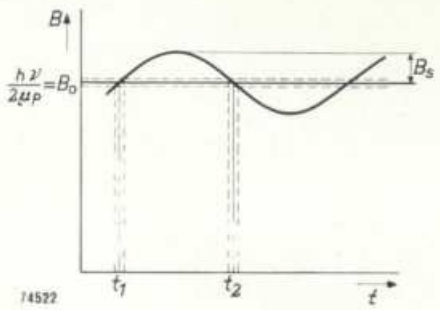


Fig. 7. Is de frequentie ν zo ingesteld dat $h\nu/2\mu_p = B_0$, dan blijven de absorptiepieken op hun plaats als de rimpelamplitude afneemt. Dit is het kenmerk voor de juiste instelling van de frequentie.

treedt voortdurend resonantie en daarmee gepaard absorptie op. De hoogfrequente spanning op de oscillatorkring is dan niet meer gemoduleerd, maar heeft een constante waarde. Daar wij op het scherm alleen de modulatie zien, zakken de pieken weg terwijl zij zich verbreden. Men moet de oscillatorfrequentie dus zo instellen, dat men, als de stroom door de hulpspoel tot nul nadert, dit verschijnsel te zien krijgt. Daarna moet de frequentie nauwkeurig gemeten worden, bijv. met een geijkte hulposcillator die zwevingen maakt met het signaal. De waarde van het veld vindt men dan met formule (3).

Men kan bij de frequentiemeting met weinig moeite de relatieve fout kleiner maken dan 10^{-4}. Stelt men minder hoge eisen, dan kan men ook gebruik maken van een vooraf gemaakte grafiek waarin de frequentie als functie van de aflezing van de condensator C_1 is uitgezet.

De amplitude van het wisselveld

Wij willen nog enige opmerkingen maken over de keuze van de amplitude B_1 van het hoogfrequente wisselveld. Vergroting van B_1 betekent vergroting van de energiedichtheid van dit veld. Er zijn dan dus meer energiequanta beschikbaar om protonen op het hogere energieniveau te brengen. In de nieuwe evenwichtstoestand die zich instelt, zal derhalve het verschil in bezetting van de twee mogelijke niveaus zijn afgenomen. Dit betekent dat de afwijking van de Boltzmann-verdeling groter is geworden, waardoor de energieafgifte aan de warmtebeweging is toegenomen. Omdat deze afgifte gelijk is aan de energieabsorptie uit het wisselveld, zal ook deze absorptie toegenomen zijn. Het zal echter duidelijk zijn dat bij steeds verder opvoeren van B_1 de afwijking van de Boltzmann-verdeling nadert tot een limiet, nl. tot de afwijking die zou bestaan als de bezetting van de twee energieniveaus gelijk was. Daarmee nadert ook de energieafgifte aan de warmtebeweging tot een limietwaarde, waaruit volgt dat hetzelfde geldt voor de energieabsorptie uit het wisselveld. Van een onbeperkt opvoeren van B_1 kan men dus geen voortdurende vergroting verwachten van de absorptiepiekjes die men op de oscillograaf waarneemt. In werkelijkheid neemt men waar dat de absorptiepiekjes eerst groter worden, maar dan weer in elkaar zakken, als men B_1 voortdurend laat toenemen. Dat dit zo moet zijn, kan men ook eenvoudig inzien. Bij de bespreking van de apparatuur is reeds opgemerkt dat de oscillator op de rand van genereren moet worden ingesteld, omdat hij dan het gevoeligst is voor veranderingen van de demping. Om B_1 op te voeren, moet men de oscillator sterker laten oscilleren, waardoor de gevoeligheid voor dempingsverandering afneemt. De toeneming van de demping en de afneming van de gevoeligheid werken elkaar dus tegen. Nadert de absorptie de maximale waarde, dan gaat de afneming van de gevoeligheid het winnen en de absorptiepiekjes nemen in grootte af.

Klassieke behandeling

Wij willen niet nalaten er op te wijzen dat de protonresonantie ook met behulp van de wetten van de klassieke mechanica kan worden behandeld [6]). De behandeling is echter vrij gecompliceerd en minder overzichtelijk dan de vereenvoudigde quantumtheoretische uiteenzetting die wij hier hebben gegeven. In de klassieke theorie wordt het proton opgevat als een tol die onder invloed van de magneetvelden een precessie gaat uitvoeren [7]). Energieoverdracht aan de warmtebeweging geschiedt met een zekere vertraging, die tot uitdrukking gebracht wordt door een „longitudinale" relaxatietijd. Deze relaxatietijd wordt sterk verkort door het toevoegen van paramagnetische ionen.

Uitvoering voor velden tot 1,4 Wb/m² (14 000 gauss)

Het meetgebied van de beschreven apparatuur is ongeveer van 0,16 tot 0,82 Wb/m² (1600 tot 8200 gauss), wat correspondeert met een frequentiegebied van de oscillator van 6,8 tot 35 MHz. Er is ook een apparaat uitgevoerd voor meting van veldsterkten tot 1,4 Wb/m² (14 000 gauss) (*fig. 8*). Daarvoor moest het frequentiegebied van de oscillator tot 60 MHz reiken. Dit werd mogelijk door de gehele oscillator in de spoelhouder te monteren. Hierdoor verviel de verbindingskabel tussen het spoeltje en de buis van de oscillator, zodat de capaciteit in de kring werd verminderd. Het is waarschijnlijk mogelijk de bovenste grens van het meetgebied naar 20 Wb/m² (20 000 gauss) te verschuiven.

---

[6]) F. Bloch, Nuclear induction, Phys. Rev. **70**, 460-485, 1946.

[7]) Men zie bijv. ook H. G. Beljers en J. L. Snoek, Gyromagnetische verschijnselen in ferrieten, Philips techn. T. **11**, 317-325, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

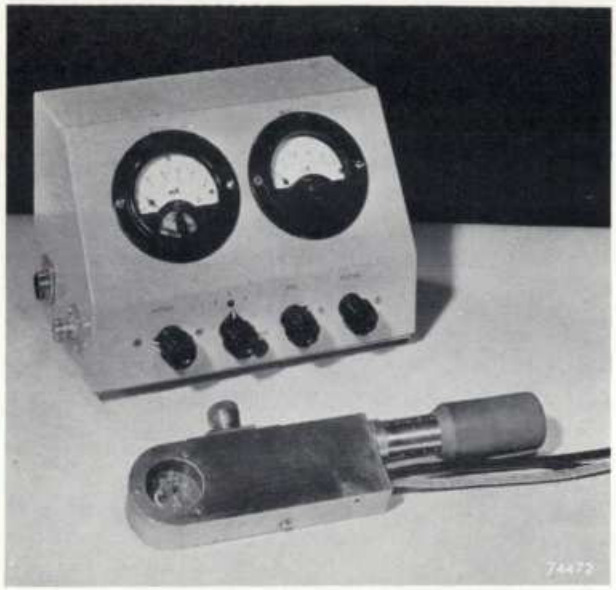


Fig. 8. Uitvoering van de protonresonantie-apparatuur voor velden van 0,5 tot 1,4 Wb/m² (5000 tot 14 000 gauss). De oscillatorfrequentie kan hier worden gevarieerd van 21 tot 60 MHz. Dit is bereikt door de gehele oscillator in de spoelhouder onder te brengen, waardoor de verbindingskabel tussen buis en oscillatorspoel kon vervallen en de capaciteit in de oscillatorkring werd verminderd. De dubbele triode bevindt zich in het handvat, dus zo ver mogelijk van het te meten magneetveld verwijderd. In een sterk magneetveld zouden de triodes niet meer werken. Achter de spoelhouder staat de apparatuur voor versterking en detectie van het signaal. De verbindingskabel met de spoelhouder is niet aangesloten.

Een apparaat voor kleine veldsterkten (onderste grens ongeveer 10^{-2} Wb/m² (= 100 gauss) is nog in het ontwikkelingstadium.

Toepassingsvoorbeeld

Het beschreven apparaat — dat ook zeer geschikt is om het verschijnsel der kernspinresonantie te demonstreren — kan bijv. gebruikt worden om de inductie in de luchtspleet van een permanente magneet in de loop van de tijd te controleren. Ook kan men nagaan wat de invloed is van bepaalde behandelingen, bijv. kloppen of stoten tegen de magneet, temperatuurvariaties of -cycli, enz.

Als voorbeeld wordt hier gegeven het verloop van de veldsterkte in het centrum tussen de poolschoenen van een grote permanente magneet van „Ticonal" (zie fig. 3 en tabel). Deze is in dit laboratorium vervaardigd en wordt in het bijzonder gebruikt om fluxmeetspoeltjes te ijken.

Uit de metingen kan men de conclusie trekken dat het doorlopen van een temperatuurcyclus naar boven de inductie doet dalen, althans voor de eerste keer. Dit procédé moet dus als een soort veroudingsproces opgevat worden. Overigens blijkt uit beide temperatuurcycli dat de magneet een negatieve temperatuurcoëfficient van ongeveer $0{,}85 \cdot 10^{-4}$ Wb/m² per °C vertoont.

Tabel. Inductie in luchtspleet van grote „Ticonal" magneet.

Datum	Behandeling	Inductie in Wb/m², na behandeling gemeten
25-11-51		0,4351
3-12-51		0,4350
16- 1-52		0,43325
16- 1-52	Verwarming van 20 tot 49 °C	0,4301
16- 1-52	Afkoeling tot 19 °C	0,4326
18- 1-52		0,4326
18- 1-52	Verwarming van 20 tot 68 °C	0,4284
18- 1-52	Afkoeling tot 20 °C	0,4325

Samenvatting van I, II en III. Drie op geheel verschillende principes gebaseerde opstellingen voor het meten van magnetostatische velden worden beschreven. Het eerste apparaat bevat een spoeltje van zeer geringe afmetingen (buitendiameter 1 mm, lengte 1,5 mm), dat op de as van een synchroon motortje is gemonteerd. Het spoeltje wordt door de motor met constante hoeksnelheid in het te meten veld rondgedraaid. De opgewekte spanning wordt via sleepringen en sleepveren toegevoerd aan een versterker. De versterkte en gelijkgerichte spanning is een maat voor de magnetische inductie. De afhankelijkheid der aanwijzing van de netfrequentie is gecompenseerd door de versterker een geschikte frequentiekarakteristiek te geven. Het meetgebied is zeer groot (10^{-4} tot 3 Wb/m² (d.i. 1 tot 30 000 gauss). De meting is tot op 3% nauwkeurig.

Het tweede apparaat is speciaal ontwikkeld voor het meten van het veldverloop langs de as van een magnetische electronenlens. Een lange dunne solenoïde, waarvan de wikkelrichting in het midden omkeert, is verticaal opgehangen aan twee horizontale bladveertjes. De electronenlens wordt opgesteld met haar as samenvallend met die van de solenoïde. Wanneer een constante wisselstroom van 50 Hz door de solenoïde wordt gestuurd, ontstaat hierop een wisselende kracht, die evenredig is met de magnetische inductie ter plaatse van het omkeerpunt in de wikkeling. De solenoïde voert dan een verticale trillende beweging uit, die wordt overgebracht op de saffiernaald van een grammofoonopnemer. De opgewekte wisselspanning wordt versterkt en is een maat voor de gezochte inductie. Voor de practische uitvoering is essenticel dat de apparatuur trillingsvrij wordt opgesteld. Het veld in ieder punt op de as van een magnetische electronenlens kan volgens deze methode snel en eenvoudig worden gemeten met een fout kleiner dan 1%.

Bij het derde apparaat wordt een klein vat met water in het te meten veld geplaatst. Door een zwak wisselveld dat loodrecht op het te meten veld wordt gesuperponeerd, worden de waterstofkernen in de watermoleculen tot resonantie gebracht. De frequentie waarbij deze protonresonantie optreedt is evenredig met de sterkte van het te meten veld (30 MHz in een veld van 0,7047 Wb/m²). De meting van de magnetische inductie is zo teruggebracht tot de meting van deze resonantiefrequentie, die met grote nauwkeurigheid kan worden uitgevoerd. De methode is zeer geschikt voor de absolute meting, met grote precisie, van sterke homogene magneetvelden (fout kleiner dan $^1/_{10}$ promille). Het meetgebied loopt van 0,16 tot 0,82 Wb/m². Bij een andere uitvoering van het apparaat is het 0,5 tot 1,4 Wb/m². De methode is in het Philips-laboratorium te Eindhoven o.a. toegepast om de constantheid van een grote, voor ijkdoeleinden gebouwde, permanente magneet te controleren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!